

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería en Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Implementación y análisis de efectos de audio en GUI para  
prácticas de la EPS**

**Juan Manuel Albañil Aguado  
Tutor: Daniel Ramos Castro**

**Junio 2016**



# **Implementación y análisis de efectos de audio en GUI para prácticas de la EPS**

**AUTOR: Juan Manuel Albañil Aguado**

**TUTOR: Daniel Ramos Castro**

**Biometric Recognition Group - ATVS  
Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid  
junio de 2016**



## Resumen (castellano)

En este TFG se han implementado varios efectos de audio digital en Matlab™, se han analizado tanto los efectos generados como efectos que tiene la DAW Reaper™ y se ha implementado una interfaz gráfica en Matlab™ para analizar los efectos.

Los bloques que se desarrollan son:

- Implementación y análisis de efectos en Matlab™: se han implementado varios efectos con Matlab™ y después se han analizado en detalle.
- Análisis de efectos de Reaper™ en Matlab™: se han seleccionado varios efectos de Reaper™ para analizarlos en detalle.
- Implementación de interfaz gráfica de Matlab™: se ha implementado una GUI para analizar los efectos de manera sencilla.

La finalidad de este Trabajo de Fin de Grado ha sido generar material docente adicional para las prácticas de laboratorio de la asignatura Tecnologías de Audio de cuarto curso del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación.

## Abstract (English)

In this TFG have implemented several digital audio effects in Matlab™, have analyzed how much the effects generate effects of the DAW Reaper™ and has implemented a graphical interface in Matlab™ to analyze the effects.

The blocks that are developed are:

- Implementation and effects analysis in Matlab™: several effects have been implemented with Matlab™ and then analyzed in detail.
- Analysis of effects Reaper™ in Matlab™: have selected multiple effects Reaper™ to analyze in detail.
- Implementation GUI Matlab™: a GUI is implemented to analyze the effects easily.

The purpose of this TFG has been to generate educational material for laboratory practices the subject Audio Technologies 4<sup>th</sup> Grade ITST.

## Palabras clave (castellano)

Audio, efectos, ecualización, reverberación, retardo, compresión, *flanger*, *phaser*, Matlab™, Reaper™, GUI, DAFX.

## Keywords (inglés)

Audio, effects, EQ, reverb, delay, compression, flanger, phaser, Matlab™, Reaper™, GUI, DAFX.



## ***Agradecimientos***

*Lo primero de todo, dar las gracias a mi tutor Daniel por toda la dedicación, apoyo, ánimo y ayuda que me ha prestado a mí y a este trabajo y gracias también por todo lo que me ha enseñado.*

*También dar las gracias a mis amigos de toda la vida por aguantarme en los malos momentos que he tenido durante este largo camino y a los amigos hechos en la carrera que me han ayudado tanto y que siempre estarán conmigo.*

*Por último y no menos importante, a mi familia, en especial a mi madre, a mi padre y a mi hermano. Gracias por aguantarme, por animarme a seguir, por enseñarme a no rendirme y a luchar por lo que quiero.*

*Gracias a todos vosotros por estar a mi lado.*





## INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	1
2	Estado del arte .....	2
2.1	Efectos de audio digital .....	2
2.1.1	Flanger .....	2
2.1.2	Phaser.....	2
2.1.3	Ecualización.....	4
2.1.4	Reverberación .....	6
2.1.5	Retardo ( <i>Delay</i> ) .....	8
2.1.6	Compresión.....	9
2.2	Reaper™.....	9
3	Implementación y análisis de audio digital en Matlab™ .....	11
3.1	Flanger .....	11
3.2	Phaser.....	13
3.2.1	<i>Phaser</i> mediante filtros de banda eliminada.....	15
3.2.2	<i>Phaser</i> mediante filtros paso todo .....	17
4	Análisis de efectos de audio digital de Reaper™ .....	19
4.1	ReaEQ.....	19
4.1.1	ReaEQ: Explicación .....	19
4.1.2	ReaEQ: Análisis .....	20
4.2	ReaVerb .....	25
4.2.1	ReaVerb: Explicación.....	25
4.2.2	ReaVerb: Análisis.....	26
4.3	ReaDelay .....	29
4.3.1	ReaDelay: Explicación .....	29
4.3.2	ReaDelay: Análisis .....	30
4.4	ReaComp .....	32
4.4.1	ReaComp: Explicación .....	32
4.4.2	ReaComp: Análisis .....	33
5	Interfaz gráfica para el análisis en Matlab™.....	37
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	38
6.1	Conclusiones.....	38
6.2	Trabajo futuro .....	38
	Referencias .....	39
	Anexos.....	I
A	Ejemplo de la interfaz de Reaper™.....	I
B	Interfaz gráfica de Matlab™ implementada .....	III



# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL EFECTO <i>FLANGER</i> .....	2
FIGURA 2-2: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL EFECTO <i>PHASER</i> CON FILTROS DE BANDA ELIMINADA .....	3
FIGURA 2-3: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL EFECTO <i>PHASER</i> CON FILTROS PASO TODO .....	3
FIGURA 2-4: DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN ECUALIZADOR FORMADO POR FILTROS <i>SHELVING</i> PASO ALTO Y PASO BAJO Y FILTROS <i>PEAK</i> .....	5
FIGURA 2-5: FILTRO <i>SHELVING</i> . A LA IZQUIERDA FILTRO <i>SHELVING</i> DE PRIMER ORDEN Y A LA DERECHA FILTRO <i>SHELVING</i> DE SEGUNDO ORDEN .....	5
FIGURA 2-6: FILTRO <i>PEAK</i> DE SEGUNDO ORDEN. A LA IZQUIERDA LA FORMA TÍPICA CON EL MISMO ANCHO DE BANDA Y DISTINTAS GANANCIAS. A LA DERECHA LA FORMA TÍPICA CON UNA MISMA GANANCIA Y DISTINTOS ANCHOS DE BANDA .....	6
FIGURA 2-7: EJEMPLO EN dB DE UNA RESPUESTA AL IMPULSO DE UNA SALA CON REVERBERACIÓN7	
FIGURA 2-8: ESQUEMA DE LA FORMACIÓN DE LA REVERBERACIÓN EN UNA SALA A PARTIR DE LAS MÚLTIPLES REFLEXIONES DE LAS ONDAS SONORAS DESDE UNA FUENTE (ARRIBA IZQUIERDA), RESPUESTA AL IMPULSO DE LA REVERBERACIÓN EN LA SALA DE LA IZQUIERDA (ARRIBA DERECHA), DIAGRAMA DE BARRAS REPRESENTANDO EL EFECTO DE LA REVERBERACIÓN CON SONIDO DIRECTO, EL TIEMPO DE RETARDO INICIAL Y LAS REFLEXIONES (ABAJO).....	7
FIGURA 2-9: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL EFECTO <i>DELAY</i> .....	8
FIGURA 2-10: FORMA TÍPICA DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN FILTRO FIR .....	8
FIGURA 2-11: CURVA ESTÁTICA Y CURVA DE GANANCIA .....	9
FIGURA 2-12: LOGO DE REAPER™ .....	10
FIGURA 2-13: EJEMPLO DE REAPER™ EN EL QUE SE AÑADE UN EFECTO DE AUDIO EN UN ARCHIVO DE AUDIO .....	10
FIGURA 3-1: SEÑAL SINUSOIDAL ELEGIDA COMO SEÑAL MODULADORA.....	11
FIGURA 3-2: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN RETARDO MÍNIMO .....	12
FIGURA 3-3: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN RETARDO MEDIO.....	12
FIGURA 3-4: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN RETARDO MÁXIMO .....	13
FIGURA 3-5: SEÑAL MODULADORA CON $FC = 200$ Hz, COEFICIENTE DE MODULACIÓN = 0.8 Y $RATE = 1$ Hz .....	14
FIGURA 3-6: SEÑAL MODULADORA CON $FC = 700$ Hz, COEFICIENTE DE MODULACIÓN = 0.8 Y $RATE = 1$ Hz .....	14

FIGURA 3-7: SEÑAL MODULADORA CON $FC = 1.5$ KHz, COEFICIENTE DE MODULACIÓN = 0.8 Y $RATE = 1$ Hz .....	14
FIGURA 3-8: SEÑAL MODULADORA CON $FC = 2.3$ KHz, COEFICIENTE DE MODULACIÓN = 0.8 Y $RATE = 1$ Hz .....	15
FIGURA 3-9: SEÑAL MODULADORA CON $FC = 3$ KHz, COEFICIENTE DE MODULACIÓN = 0.8 Y $RATE = 1$ Hz .....	15
FIGURA 3-10: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA CORRESPONDIENTE A LA FRECUENCIA MÍNIMA DE LA SEÑAL MODULADORA .....	16
FIGURA 3-11: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA CORRESPONDIENTE A LA FRECUENCIA CENTRAL DE LA SEÑAL MODULADORA .....	16
FIGURA 3-12: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA CORRESPONDIENTE A LA FRECUENCIA MÁXIMA DE LA SEÑAL MODULADORA .....	16
FIGURA 3-13: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA CORRESPONDIENTE A LA FRECUENCIA MÍNIMA DE LA SEÑAL MODULADORA .....	17
FIGURA 3-14: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA CORRESPONDIENTE A LA FRECUENCIA CENTRAL DE LA SEÑAL MODULADORA .....	18
FIGURA 3-15: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA CORRESPONDIENTE A LA FRECUENCIA MÁXIMA DE LA SEÑAL MODULADORA .....	18
FIGURA 4-1: EJEMPLO DE FILTROS <i>SHELVING</i> EN EL EFECTO REAEQ DE REAPER™ .....	19
FIGURA 4-2: EJEMPLO DE FILTROS <i>PEAK</i> EN EL EFECTO REAEQ DE REAPER™ .....	19
FIGURA 4-3: MÓDULO DE LA SEÑAL DE ENTRADA EN FRECUENCIA (AZUL SÓLIDO), MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>SHELVING</i> LP DE $FC$ 100 Hz GANANCIA 6 dB Y BW 0.1 OCT (NEGRO PUNTO Y RAYA) Y MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>SHELVING</i> LP DE $FC$ 100 Hz GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 (ROJO RAYAS) .....	20
FIGURA 4-4: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>SHELVING</i> LP CON $FC$ 100 Hz GANANCIA 6 dB Y BW 0.1 OCT (AZUL SÓLIDO) Y MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>SHELVING</i> LP CON $FC$ 100 Hz GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 OCT (ROJO RAYAS). ...	21
FIGURA 4-5: MÓDULO DE LA SEÑAL DE ENTRADA EN FRECUENCIA (AZUL SÓLIDO), MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>PEAK</i> DE $FC$ 300 Hz GANANCIA 6 dB Y BW 0.1 OCT (NEGRO PUNTO Y RAYA) Y MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>PEAK</i> DE $FC$ 300 Hz GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 (ROJO RAYAS) .....	22
FIGURA 4-6: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>PEAK</i> CON $FC$ 300 Hz GANANCIA 6 dB Y BW 0.1 OCT (AZUL SÓLIDO) Y MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>PEAK</i> CON $FC$ 300 Hz GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 OCT (ROJO RAYAS). .....	22
FIGURA 4-7: MÓDULO DE LA SEÑAL DE ENTRADA EN FRECUENCIA (AZUL SÓLIDO), MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>PEAK</i> DE $FC$ 1 KHz GANANCIA 6 dB Y BW 0.1	

OCT (NEGRO PUNTO Y RAYA) Y MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>PEAK</i> DE FC 1 KHZ GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 (ROJO RAYAS).....	23
FIGURA 4-8: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>PEAK</i> CON FC 1 KHZ GANANCIA 6 dB Y BW 0.1 OCT (AZUL SÓLIDO) Y MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>PEAK</i> CON FC 1 KHZ GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 OCT (ROJO RAYAS). ....	23
FIGURA 4-9: MÓDULO DE LA SEÑAL DE ENTRADA EN FRECUENCIA (AZUL SÓLIDO), MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>SHELVING HP</i> DE FC 5 KHZ GANANCIA 6 dB Y BW 0.1 OCT (NEGRO PUNTO Y RAYA) Y MÓDULO DE LA SEÑAL DE SALIDA EN FRECUENCIA CON FILTRO <i>SHELVING HP</i> DE FC 5 KHZ GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 (ROJO RAYAS).....	24
FIGURA 4-10: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>SHELVING HP</i> CON FC 5 KHZ GANANCIA 6 dB Y BW 0.1 OCT (AZUL SÓLIDO) Y MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO <i>SHELVING HP</i> CON FC 5 KHZ GANANCIA -6 dB Y BW 0.1 OCT (ROJO RAYAS). ....	24
FIGURA 4-11: MENÚ DE REAVERB CON LAS DISTINTAS OPCIONES DE REVERBERACIÓN .....	25
FIGURA 4-12: FORMA DE LA REVERBERACIÓN DEL ARCHIVO <i>NICE DRUM ROOM</i> EN EL <i>PLUG-IN</i> REAVERB.....	26
FIGURA 4-13: FORMA DE LA REVERBERACIÓN DEL ARCHIVO <i>TRIG ROOM</i> EN EL <i>PLUG-IN</i> REAVERB .....	26
FIGURA 4-14: RESPUESTA AL IMPULSO DEL ARCHIVO <i>NICE DRUM ROOM</i> .....	27
FIGURA 4-15: RESPUESTA AL IMPULSO DEL ARCHIVO <i>NICE DRUM ROOM</i> EN DETALLE DONDE SE OBSERVA EL SONIDO DIRECTO, LAS PRIMERAS REFLEXIONES Y LAS REFLEXIONES TARDÍAS .	27
FIGURA 4-16: MÓDULO DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN dB DEL ARCHIVO <i>NICE DRUM ROOM</i> ..	27
FIGURA 4-17: MÓDULO DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN dB DEL ARCHIVO <i>NICE DRUM ROOM</i> EN DETALLE DONDE SE OBSERVA EL SONIDO DIRECTO, LAS PRIMERAS REFLEXIONES Y LAS REFLEXIONES TARDÍAS .....	28
FIGURA 4-18: RESPUESTA AL IMPULSO DEL ARCHIVO <i>TRIG ROOM</i> .....	28
FIGURA 4-19: RESPUESTA AL IMPULSO DEL ARCHIVO <i>TRIG ROOM</i> EN DETALLE DONDE SE PUEDE VER EL SONIDO DIRECTO, LAS PRIMERAS REFLEXIONES Y LAS REFLEXIONES TARDÍAS .....	28
FIGURA 4-20: MÓDULO DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN dB DEL ARCHIVO <i>TRIG ROOM</i> .....	29
FIGURA 4-21: MÓDULO DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN dB DEL ARCHIVO <i>TRIG ROOM</i> EN DETALLE DONDE SE OBSERVA EL SONIDO DIRECTO, LAS PRIMERAS REFLEXIONES Y LAS REFLEXIONES TARDÍAS .....	29
FIGURA 4-22: EJEMPLO DEL <i>PLUG-IN</i> READelay DE REAPER™ .....	30
FIGURA 4-23: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL EFECTO READelay CON UN RETARDO DE 10 MS.....	31
FIGURA 4-24: MÓDULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL EFECTO READelay CON UN RETARDO DE 30 MS.....	31

FIGURA 4-25: RESPUESTA AL IMPULSO DEL EFECTO READelay CON UN RETARDO DE 10 MS .....	32
FIGURA 4-26: RESPUESTA AL IMPULSO DEL EFECTO READelay CON UN RETARDO DE 30 MS .....	32
FIGURA 4-27: EJEMPLO DE REACOMP EN REAPER™ .....	33
FIGURA 4-28: SEÑAL ORIGINAL (AZUL SÓLIDO), SEÑAL COMPRIMIDA CON RATIO 2:1 Y UMBRAL -40 DB (ROJO RAYAS), SEÑAL COMPRIMIDA CON RATIO 20:1 Y UMBRAL -40 DB (VERDE PUNTEADA) Y UMBRAL DE -40 DB (NEGRO SÓLIDO).....	34
FIGURA 4-29: DETALLE DE LA FIGURA 4-28 PARA OBSERVAR E TIEMPO DE <i>ATTACK</i> .....	34
FIGURA 4-30: DETALLE DE LA FIGURA 4-28 PARA OBSERVAR E TIEMPO DE <i>RELEASE</i> .....	35
FIGURA 4-31: DETALLE DE LA FIGURA 4-28 PARA OBSERVAR LA DIFERENCIA ENTRE COMPRESOR Y LIMITADOR.....	35
FIGURA 4-32: GANANCIA DEL COMPRESOR CON UN <i>RATIO</i> DE 2:1 (AZUL SÓLIDO) Y GANANCIA DEL COMPRESOR CON UN <i>RATIO</i> DE 20:1 (ROJO RAYAS) .....	36
FIGURA 4-33: DETALLE DE LA FIGURA 4-51 PARA OBSERVAR LAS GANANCIAS DE LOS COMPRESORES .....	36
FIGURA 5-1: INTERFAZ GRÁFICA IMPLEMENTADA EN MATLAB™ .....	37

# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

En este trabajo de fin de grado se pretende generar material docente para desarrollar nuevas prácticas del laboratorio de la asignatura Tecnologías de Audio, de cuarto curso del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación (ITST) de la Universidad Autónoma de Madrid.

Estas prácticas pretenden abarcar un mayor número de efectos de audio en las prácticas de laboratorio de los que ya existen. Para ello, se pretende analizar e implementar un conjunto diverso de diferentes efectos de audio con distintos fundamentos desde el punto de vista del procesamiento de señales. Con ello, los estudiantes aumentarán sus conocimientos en los efectos de audio digital.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de fin de grado es generar material docente para generar prácticas del laboratorio de la asignatura Tecnologías de Audio.

Para cumplir este objetivo general se han fijado dos objetivos principales y un objetivo secundario.

Los objetivos principales son:

- Implementación y análisis de efectos mediante la herramienta Matlab™.
- Análisis de efectos generados por la herramienta Reaper™ y analizados por Matlab™.

El objetivo secundario es crear una interfaz gráfica (GUI) de generación y visualización de gráficas en Matlab™ para que los análisis de los efectos sean más sencillos para los alumnos.

## 1.3 Organización de la memoria

Esta memoria está dividida en cinco partes diferentes:

1. Estado del arte, donde se explica teóricamente cada efecto de audio digital.
2. Implementación y análisis de los efectos *flanger* y *phaser*, donde se explica el proceso de implementación y posterior análisis.
3. Análisis de los efectos ecualización, reverberación, compresor y retardo generados por Reaper™.
4. Explicación de la interfaz gráfica (GUI).
5. Conclusiones y trabajo futuro, donde se expone una valoración de lo obtenido en los análisis, posibles mejoras de la GUI, nuevos efectos que se pueden implementar o generar.
6. Anexos con imágenes de la interfaz de Reaper™ y GUI en detalle.

## 2 Estado del arte

---

### 2.1 Efectos de audio digital

#### 2.1.1 Flanger

El efecto *flanger* actúa como un filtro que afecta a la respuesta en frecuencia generando ceros a lo largo del espectro. Estos ceros varían en el tiempo manteniéndose equidistantes. Este efecto genera una sensación sonora similar a un jet pasando.

Este efecto se consigue sumando a la señal original la señal original retardada. El retardo no es fijo sino variable. Esta variabilidad se consigue mediante una señal moduladora. Así se trataría de un filtro de peine variable en el tiempo.

La variabilidad puede ser lenta o rápida. El parámetro que controla esta característica se denomina *rate* o velocidad de modulación y se mide en Hertzios (Hz). Cuanto mayor sea el *rate* mayor será la velocidad con la que varíe la señal moduladora.

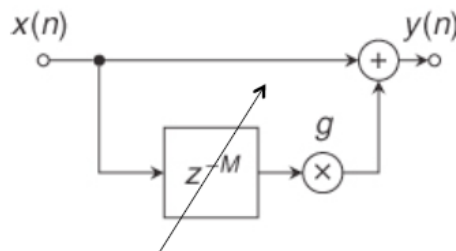


Figura 2-1: Diagrama de bloques del efecto *Flanger*

M es el número de muestras del retardo, que es el número de ceros que se generan.

El efecto *flanger* se puede definir en la siguiente fórmula:

$$y[n] = x[n] + g \cdot x[n - d(n)] \quad (1)$$

#### 2.1.2 Phaser

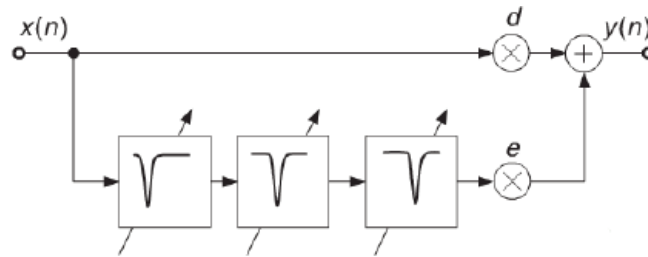
El efecto *phaser* se genera creando una o más bandas de frecuencia que eliminan la señal en el ancho de banda definido (*notches*) en el dominio de la frecuencia, cuya frecuencia central y factor de calidad se hacen variar periódicamente en el tiempo de acuerdo con una señal moduladora.

Existen dos formas de generar el efecto *phaser*:

- Mediante filtros de banda eliminada.
- Mediante filtros paso todo.



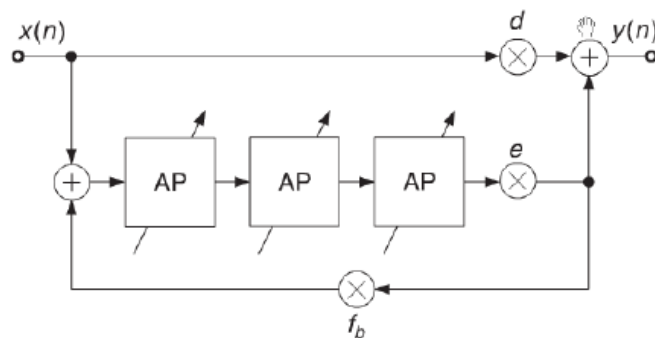
- Phaser mediante filtros de banda eliminada:



**Figura 2-2: Diagrama de bloques de la implementación del efecto *Phaser* con filtros de banda eliminada**

En este proceso de implementación, la señal de entrada se duplica. A la señal duplicada se le aplican uno o más filtros de banda eliminada que varían su frecuencia central según una señal moduladora. una vez aplicados los filtros a la señal duplicada se le añade una ganancia. A la señal original también se le añade una ganancia y se suma a la señal duplicada.

- Phaser mediante filtros paso todo:



**Figura 2-3: Diagrama de bloques de la implementación del efecto *Phaser* con filtros paso todo**

En este proceso de implementación, la señal de entrada se duplica. A la señal duplicada se le suma una señal de realimentación en la que se han aplicado uno o más filtros paso todo que varían su frecuencia central según una señal moduladora. A la suma de la señal duplicada y realimentada se le aplican uno o más filtros paso todo variables en su frecuencia central según una señal moduladora y se añade una ganancia. Ésta señal resultante se suma a la señal original, en la que se ha añadido una ganancia, dando la señal con el efecto *phaser* y además es la señal realimentada mencionada anteriormente.

Se puede demostrar que por cada filtro paso todo en la cadena central se obtiene un filtro de banda eliminada, centrado en la frecuencia central de cada filtro paso todo.

#### Filtro paso todo:

Los filtros paso todo dejan pasar toda la señal.

El filtro paso todo tiene la siguiente función de transferencia.

$$A(z) = \frac{-c + d(1 - c)z^{-1} + z^{-2}}{1 + d(1 - c)z^{-1} - cz^{-2}}$$

(2)

Donde c y d son:

$$c = \frac{\tan\left(\pi \frac{fb}{fS}\right) - 1}{\tan\left(\pi \frac{fb}{fS}\right) + 1}$$

(3)

$$d = -\cos\left(2\pi \frac{fc}{fS}\right)$$

(4)

Fc es la frecuencia central, fb es el ancho de banda y fS es la frecuencia de muestreo.

La respuesta en frecuencia es:

$$H(z) = \frac{1}{2} A(z)$$

(5)

#### Filtros de banda eliminada:

Los de banda eliminada dejan pasar toda la señal a excepción de la banda definida por la frecuencia central y el ancho de banda.

El filtro de banda eliminada se puede implementar con filtros paso todo, lo único que cambia es la respuesta en frecuencia:

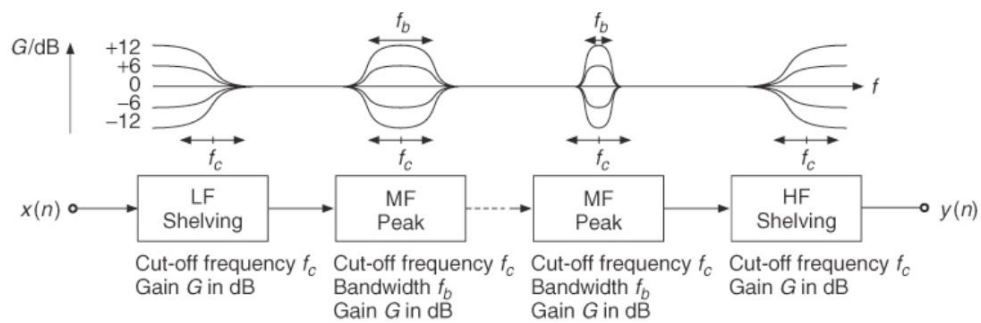
$$H(z) = \frac{1}{2} [1 + A(z)]$$

(6)

Se puede demostrar que la respuesta en frecuencia obtenida es de banda eliminada.

### **2.1.3 Ecualización**

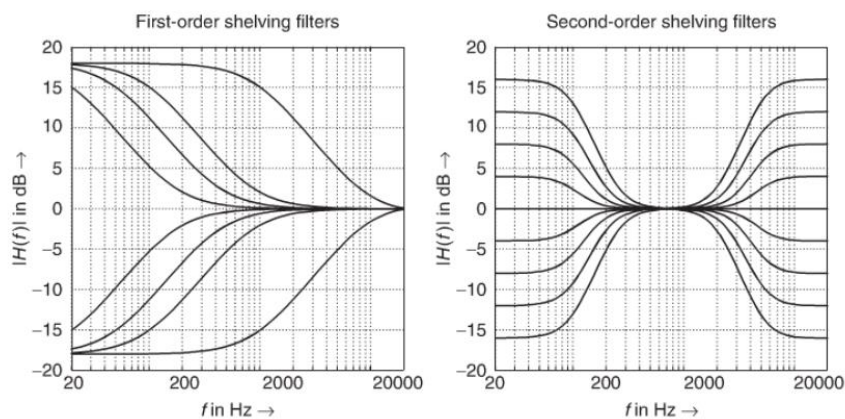
Los ecualizadores permiten realizar un control adecuado sobre la señal de audio en el dominio de la frecuencia para obtener la señal de audio deseada. Ese control se realiza mediante la implementación de distintos tipos de filtros y su uso en cascada, con lo que se multiplican sus respuestas en frecuencia.



**Figura 2-4: Diagrama de bloques de un ecualizador formado por filtros *Shelving* paso alto y paso bajo y filtros *Peak***

### Filtros *shelving*:

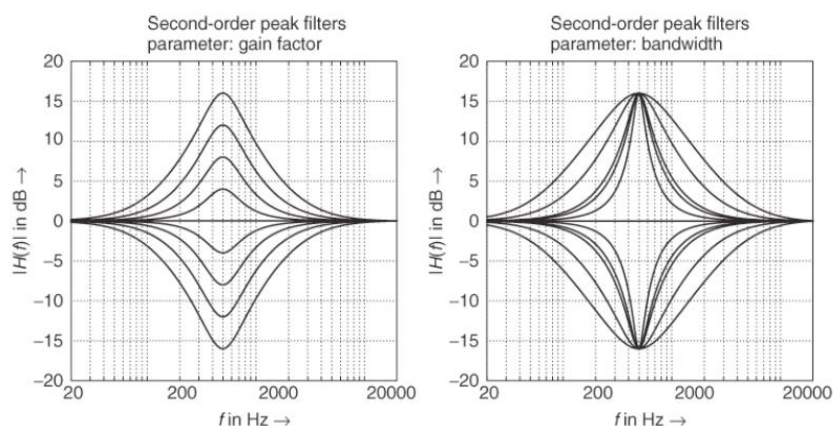
Son filtros utilizados para el control del tono, realzando o atenuando un amplio espectro de frecuencias bajas o altas con ganancia unidad fuera de la banda de paso.



**Figura 2-5: Filtro *Shelving*. A la izquierda filtro *Shelving* de primer orden y a la derecha filtro *Shelving* de segundo orden**

### Filtros *Peak*:

Son filtros resonantes con ganancia unidad fuera de la banda de paso, que se utilizan para atenuar o realzar un espectro de frecuencias alrededor de una frecuencia central o frecuencia de resonancia.



**Figura 2-6: Filtro *Peak* de segundo orden. A la izquierda la forma típica con el mismo ancho de banda y distintas ganancias. A la derecha la forma típica con una misma ganancia y distintos anchos de banda**

Se pueden diferenciar dos modelos de ecualizadores, ecualizadores gráficos y ecualizadores paramétricos.

#### Ecualizadores gráficos:

Ecualizadores compuestos por un cierto número de filtros selectivos cuyas frecuencias centrales están dispuestas de forma logarítmica. Esta distribución será a intervalos de una octava en los modelos más comunes y de intervalos menores, típicamente de un tercio de octava en modelos de más calidad. Cada filtro tiene un control de ganancia para atenuar o amplificar la banda de frecuencia sobre la que actúa. [4]

#### Ecualizadores paramétricos:

Ecualizadores que permiten ajustar de forma continua los parámetros del filtro (frecuencia central, ancho de banda o factor Q y ganancia).

- Frecuencia central: valor sobre el que actúa cada filtro.
- Ancho de banda: amplitud de la zona de trabajo.
- Factor Q: relación entre la frecuencia central y el ancho de banda.
- Ganancia: atenuación o amplificación que provoca el filtro sobre la señal.

### **2.1.4 Reverberación**

La reverberación es un efecto sonoro natural que se genera a partir de la suma de múltiples reflexiones de las ondas sonoras producidas por alguna fuente sonora.

Desde cualquier fuente sonora existe un sonido directo a nuestros oídos. Las ondas reflejadas llegarán más tarde a nuestros oídos y más débiles, ya que, con cada reflexión, la onda sonora pierde energía.

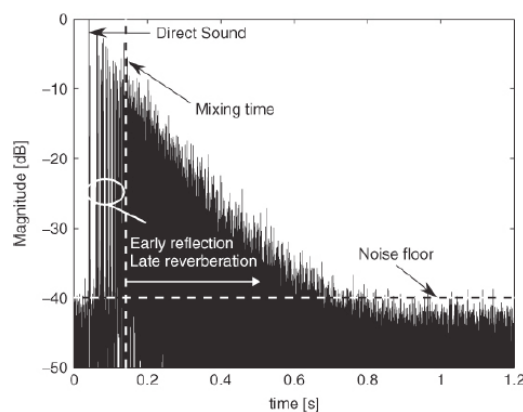
En la respuesta al impulso de una sala con reverberación se encuentran tres tipos de sonido:

- Sonido directo: es el sonido que llega al receptor directamente desde el emisor.

- Primeras reflexiones; es el sonido que llega al receptor tras reflexiones en el suelo, techo...
- Reflexiones tardías: es el sonido que llega al receptor tras reflejarse múltiples veces y a su vez, estas reflexiones se han reflejado múltiples veces generando una “cola” de reverberación en el tiempo con una gran cantidad de reflexiones recibidas.

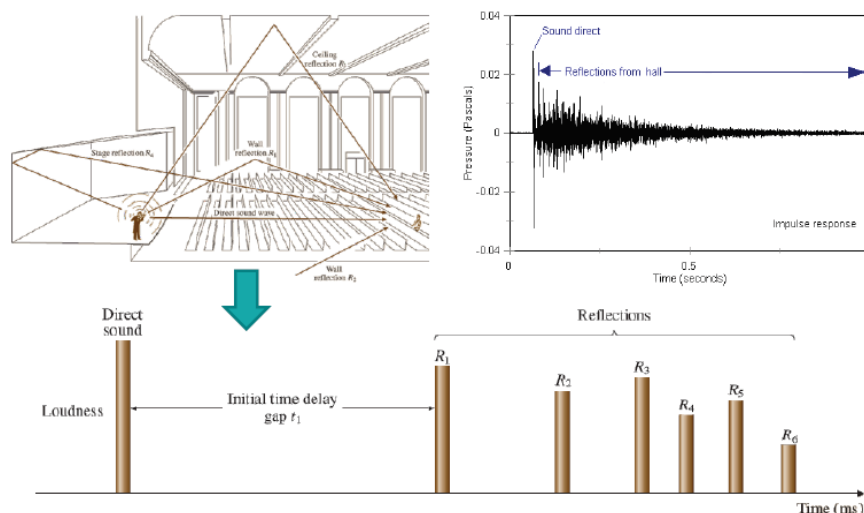
En la reverberación, la respuesta al impulso contiene toda la información de las propiedades acústicas de la sala entre emisor y receptor.

El tiempo de reverberación se suele definir como el tiempo que tarda la señal reverberada en atenuarse 60 dB cuando el emisor ha dejado de emitir un sonido.



**Figura 2-7: Ejemplo en dB de una respuesta al impulso de una sala con reverberación**

En esta figura (2-7) es sencillo identificar las primeras reflexiones.



**Figura 2-8: Esquema de la formación de la reverberación en una sala a partir de las múltiples reflexiones de las ondas sonoras desde una fuente (arriba izquierda), respuesta al impulso de la reverberación en la sala de la izquierda (arriba derecha), diagrama de barras representando el efecto de la reverberación con sonido directo, el tiempo de retardo inicial y las reflexiones (abajo)**

En este ejemplo (figura 2-8), se observa en la respuesta al impulso dos partes, el sonido directo y las reflexiones de la sala. El sonido directo como se aprecia en el dibujo, va desde

la persona que está en el escenario al que está en los asientos, sin ninguna reflexión en el techo, suelo o paredes. Las reflexiones de la sala son tanto las que se reflejan una vez cómo las que se reflejan dos o más veces.

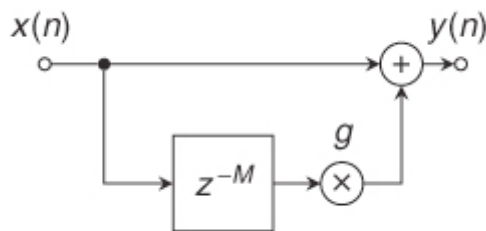
### 2.1.5 Retardo (*Delay*)

El retardo es un efecto de audio basado en un retardo fijo en el tiempo. Este efecto se consigue sumando la señal original con una señal retardada.

$$y(n) = x(n) + g \cdot x(n - M) \quad (7)$$

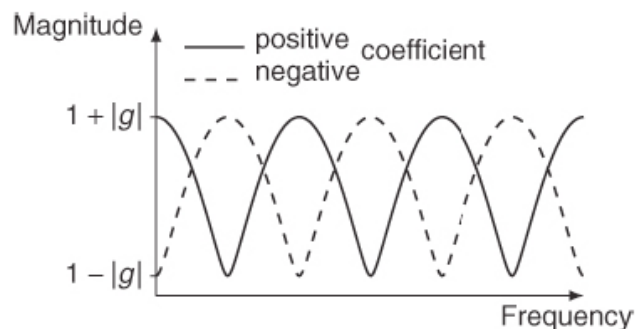
Esta expresión genera M ceros en  $H(z)$ , dando la forma de peine a  $|H(e^{j\omega})|$ .

$$H(z) = 1 + g \cdot z^{-M} \quad (8)$$



**Figura 2-9: Diagrama de bloques del efecto Delay**

Debido a que la salida de este efecto se obtiene sumando la señal original a la señal retardada, esto genera un filtro de peine FIR. Los filtros FIR son sistemas donde la salida se genera a partir de la combinación lineal de muestras de la señal de entrada y de la señal de entrada con un retardo.



**Figura 2-10: Forma típica de la respuesta en frecuencia de un filtro FIR**

### 2.1.6 Compresión

El compresor forma parte de las técnicas que modifican la dinámica, estas técnicas se basan en la transformación de la amplitud de la señal de audio.

La utilidad principal del compresor es reducir el rango dinámico de una señal.

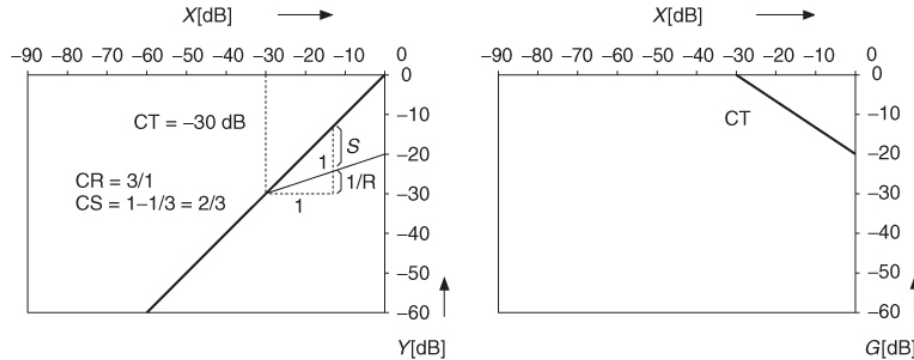


Figura 2-11: Curva estática y curva de ganancia

La mayoría de los compresores cuentan con parámetros comunes:

- Relación (*Ratio*): relación que existe entre el nivel de entrada y el nivel de salida. Una ganancia unitaria se obtendría con una relación 1:1. El primer número del *ratio* se refiere al nivel en decibelios que entran en el compresor y el segundo al nivel de decibelios que salen. Por ejemplo, un *ratio* de 4:1 significa que por cada 4 dB que entran sale 1 dB. A partir de un *ratio* de 8:1 se suele considerar un limitador y no un compresor. El *ratio* sólo se aplica a la parte de la señal que excede el umbral.
- Umbral (*Threshold*): umbral sobre el cual trabaja el compresor. Cuando la señal sobrepase el umbral fijado dará paso la compresión, reduciendo el nivel según el *ratio* elegido.
- Salida (*Output*): este parámetro aumenta la ganancia de la señal para compensar la pérdida de nivel.
- Ataque (*Attack*): tiempo que requiere el compresor para actuar cuando la señal sobrepasa el umbral fijado.
- Liberación (*Release*): tiempo que tarda el compresor en restaurar la ganancia cuando la señal vuelve a estar por debajo del umbral fijado.

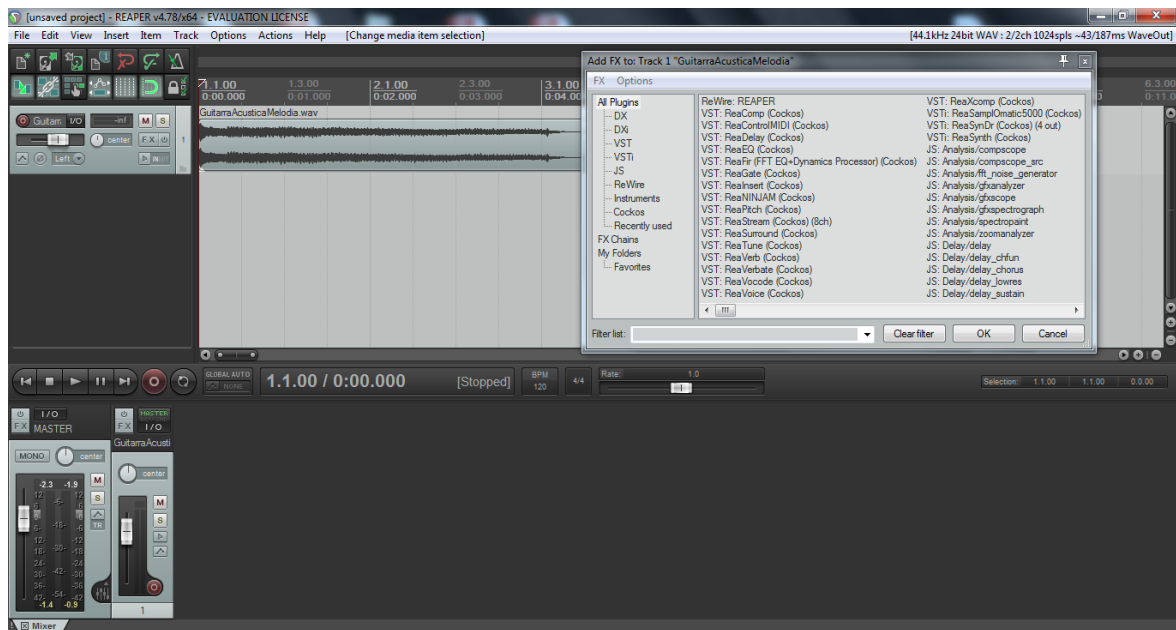
### 2.2 Reaper™

Reaper™ es una DAW (digital audio Workstation), un programa diseñado para grabación, edición y reproducción de archivos de audio.



**Figura 2-12: Logo de Reaper™**

Esta DAW permite añadir efectos de audio a archivos de audio entre otras muchas de sus opciones.



**Figura 2-13: Ejemplo de Reaper™ en el que se añade un efecto de audio en un archivo de audio**

Reaper™ es un software bastante didáctico a la hora de manejar los parámetros de los efectos además de ser sencillo de entender. Son estas razones las que han llevado a elegir ésta DAW y no otra.



## 3 Implementación y análisis de audio digital en Matlab™

### 3.1 Flanger

A partir de la figura 2-1 se ha implementado el efecto *flanger* mediante la herramienta Matlab™.

La implementación se ha basado en cargar un fichero de audio, aplicarle un retardo variable en el tiempo y generar la señal de salida cómo en la fórmula 2-1.

Tras este proceso se ha calculado la transformada de Fourier para la señal de entrada y la señal de salida, y se ha obtenido la respuesta en frecuencia. para el análisis sólo interesa observar el módulo de la respuesta en frecuencia.

Dado que el filtro es un filtro variable en el tiempo, para visualizar el módulo de la respuesta en frecuencia se han fijado tres retardos, es decir, se han tomado tres filtros fijos.

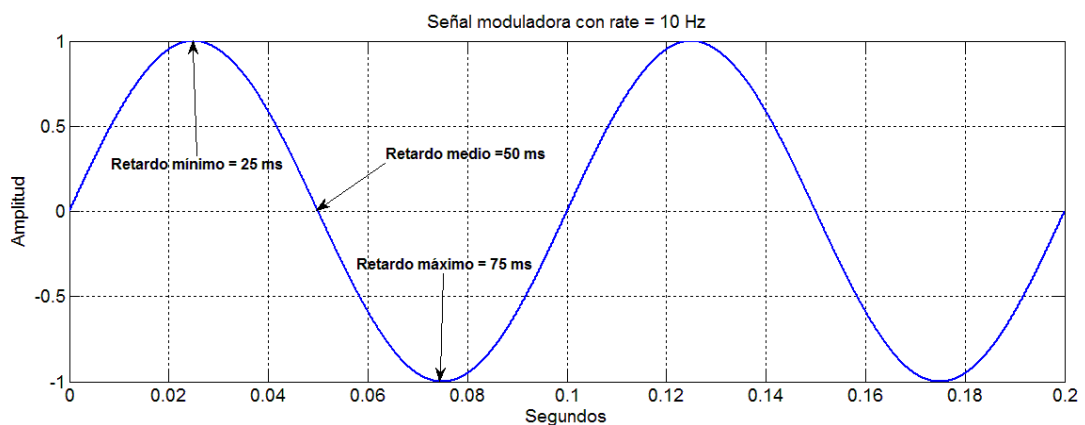
La elección de estos retardos está basada en tres puntos de la señal moduladora.

La señal moduladora elegida ha sido una señal sinusoidal cuya velocidad de modulación (*rate*) son 10 Hz. La señal sinusoidal tiene la siguiente forma:

$$\sin(2\pi \cdot n \cdot (\text{rate}/f_s))$$

(9)

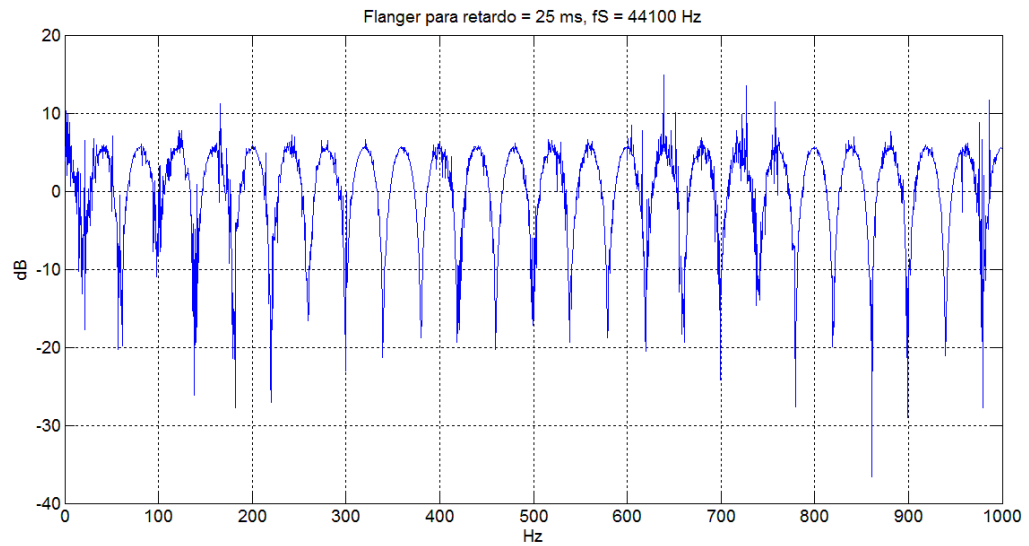
Donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo y  $n$  es el número de muestras de la señal se entrada.



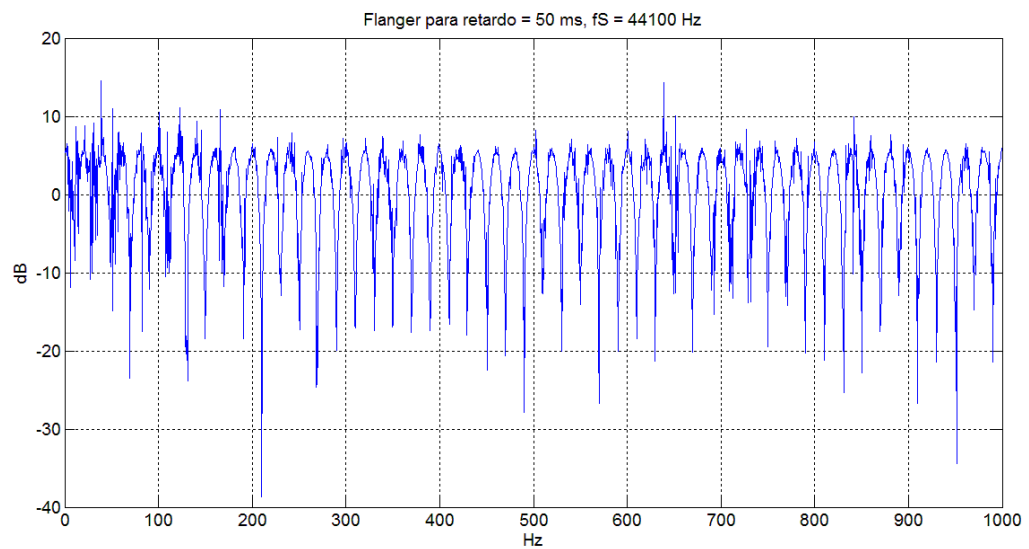
**Figura 3-1: Señal sinusoidal elegida como señal moduladora**

Los puntos elegidos para el análisis son los marcados en la figura 3-1, 25 ms, donde el retardo será mínimo, 50 ms, donde el retardo será medio y 75 ms donde el retardo será máximo.

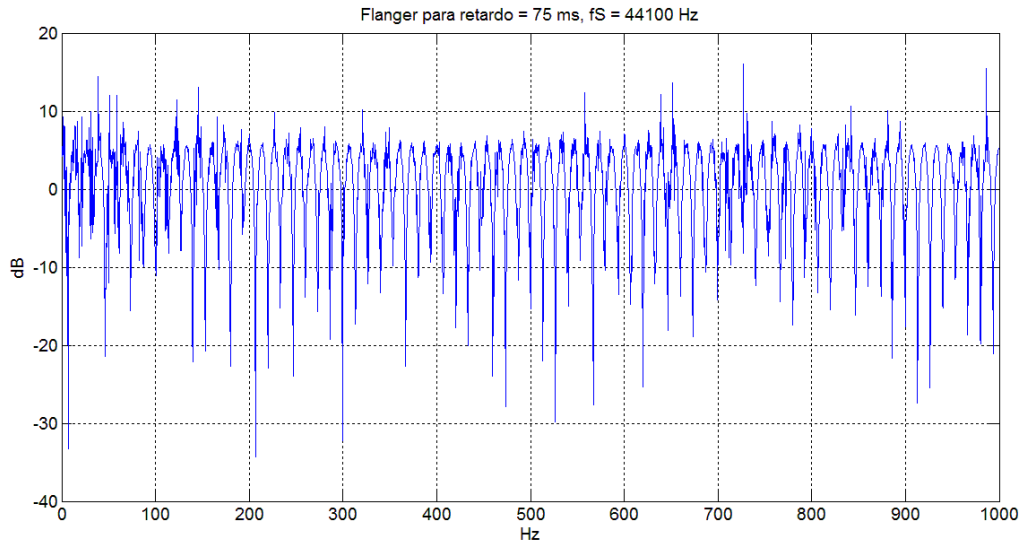
El módulo de la respuesta en frecuencia se observa en las siguientes figuras:



**Figura 3-2: Módulo de la respuesta en frecuencia para un retardo mínimo**



**Figura 3-3: Módulo de la respuesta en frecuencia para un retardo medio**



**Figura 3-4: Módulo de la respuesta en frecuencia para un retardo máximo**

El efecto *flanger* se comporta como un filtro de peine y eso es lo que se observa en las tres figuras anteriores (3-2, 3-3, 3-4). Cuanto mayor sea el retardo, menor será la separación entre ceros, lo que significa que se generan más ceros en el espectro, esto se debe a que el número de muestras del retardo es el número de ceros generados.  $M$  es el número de ceros generados y se calcula multiplicando la frecuencia de muestreo por el valor del retardo, es decir,  $M = fS \cdot d$ . La distancia entre ceros se obtiene así:  $\frac{fS}{M}$ . Esto es debido a que los ceros que se obtienen son equidistantes en frecuencia. Sustituyendo por el valor de  $M$  se obtiene:  $\frac{fS}{fS \cdot d} = \frac{1}{d}$  así se demuestra teóricamente que cuanto mayor sea el retardo, menor será la separación entre ceros.

### 3.2 Phaser

El efecto *phaser* se ha implementado siguiendo los diagramas de las figuras 2-2 y 2-3.

En la implementación del efecto *phaser* se han utilizado en los dos casos las siguientes frecuencias centrales de las bandas eliminadas por los filtros: 200 Hz, 700 Hz, 1.5 kHz, 2.3 kHz y 3 kHz.

La señal moduladora elegida ha sido una señal sinusoidal y para cada frecuencia central se ha obtenido una señal moduladora con un coeficiente de modulación de 0.8, este coeficiente sirve para que la frecuencia mínima de las bandas atenuadas sea positiva y esté moderadamente alejada de 0 Hz.

$$0.8 \cdot f_c \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot rate) \quad (10)$$

Donde  $f_c$  es la frecuencia central,  $t$  es la duración en segundos de la señal de entrada y  $rate$  la velocidad de modulación, en este caso siempre es 1 Hz.

Las señales moduladoras son las siguientes:

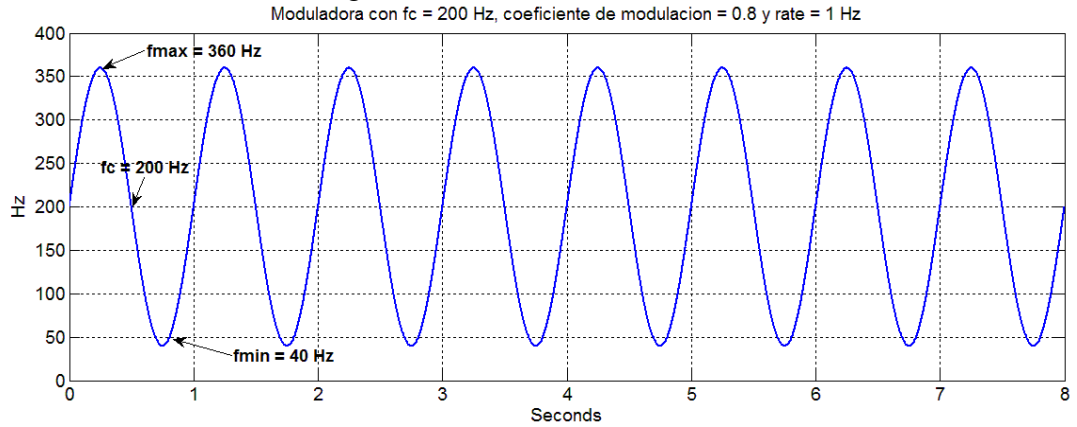


Figura 3-5: Señal moduladora con  $f_c = 200$  Hz, coeficiente de modulación = 0.8 y  $rate = 1$  Hz

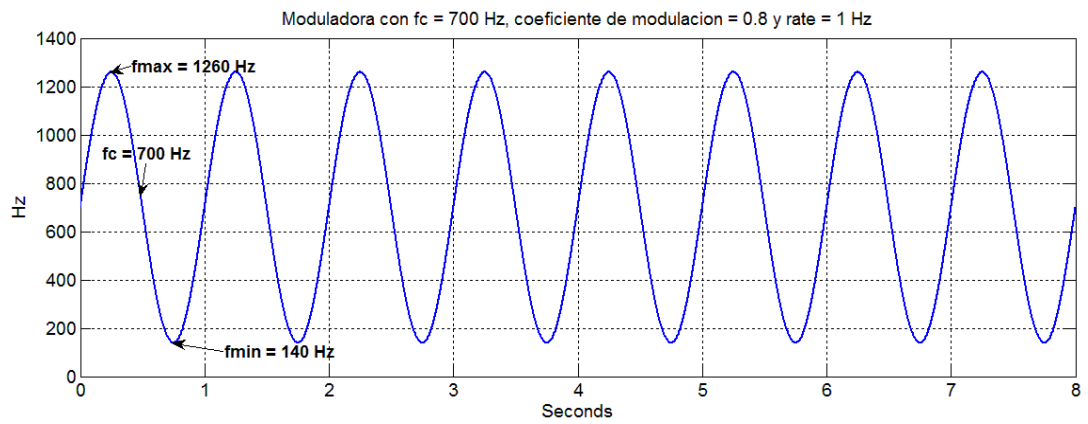


Figura 3-6: Señal moduladora con  $f_c = 700$  Hz, coeficiente de modulación = 0.8 y  $rate = 1$  Hz

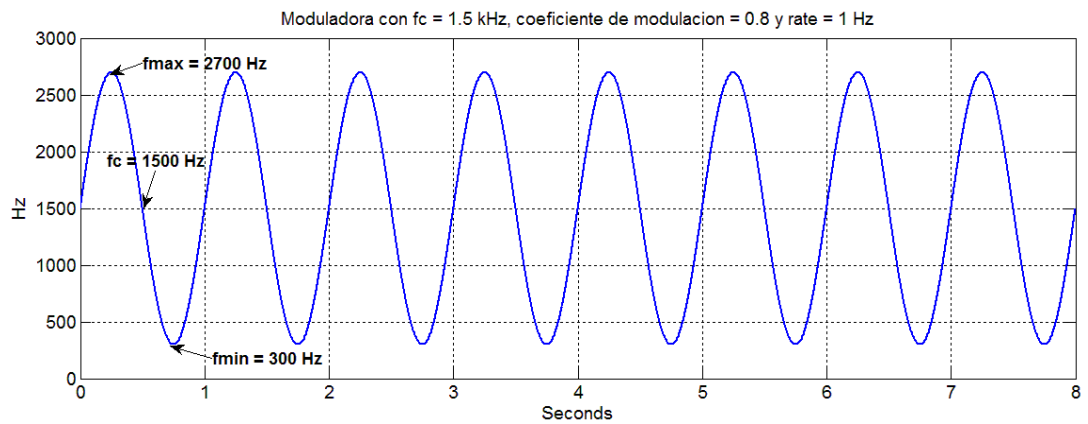
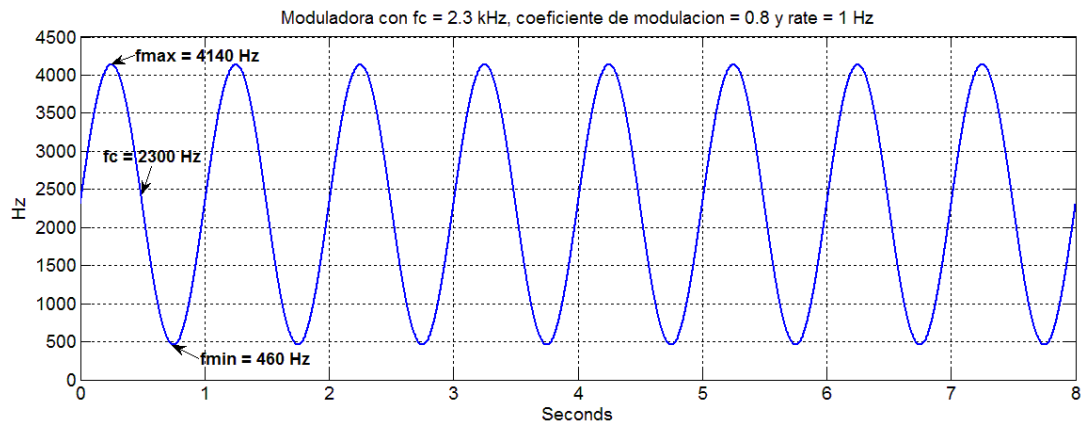
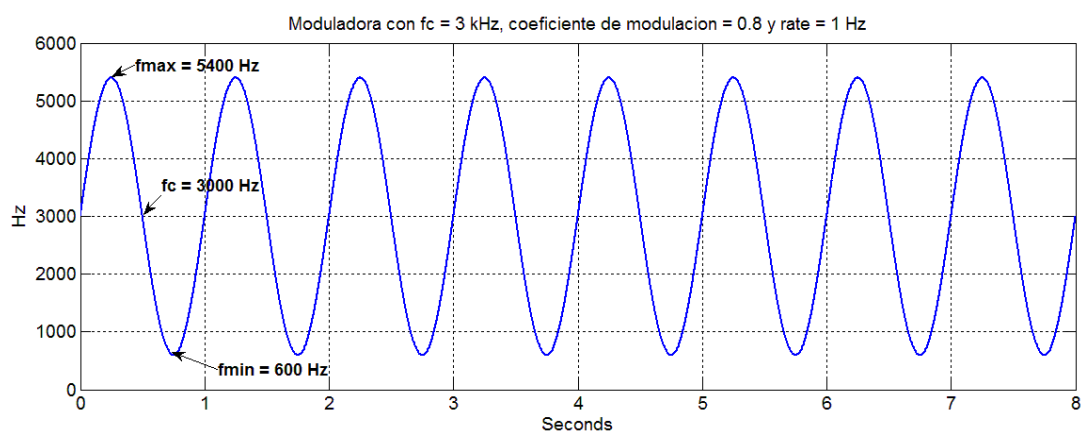


Figura 3-7: Señal moduladora con  $f_c = 1.5$  kHz, coeficiente de modulación = 0.8 y  $rate = 1$  Hz



**Figura 3-8: Señal moduladora con  $f_c = 2.3$  kHz, coeficiente de modulación = 0.8 y  $rate = 1$  Hz**



**Figura 3-9: Señal moduladora con  $f_c = 3$  kHz, coeficiente de modulación = 0.8 y  $rate = 1$  Hz**

### 3.2.1 Phaser mediante filtros de banda eliminada

Esta implementación se ha basado en el diagrama de la figura 2-2, usando cinco filtros en lugar de tres.

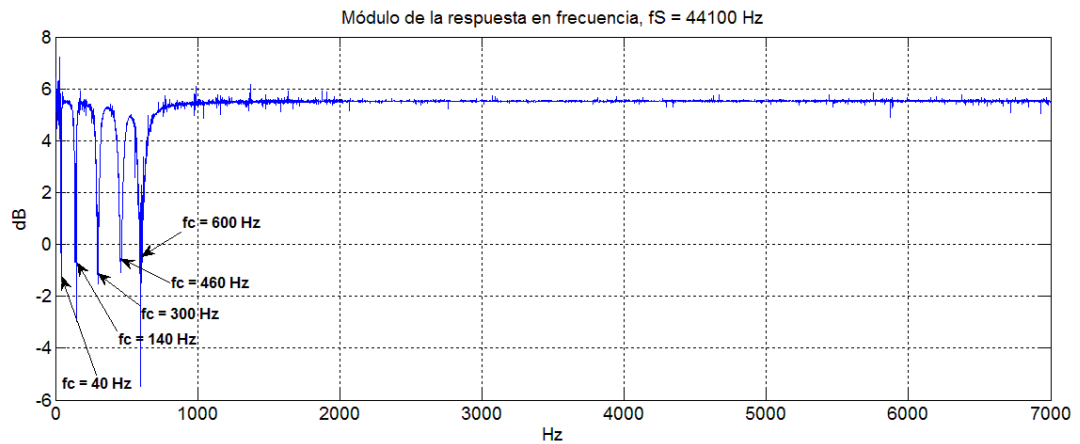
Los parámetros elegidos a excepción de los ya mencionados al principio del apartado (frecuencias centrales,  $rate$ , coeficiente de modulación) son:

- $e = 0.99$
- $d = 0.9$

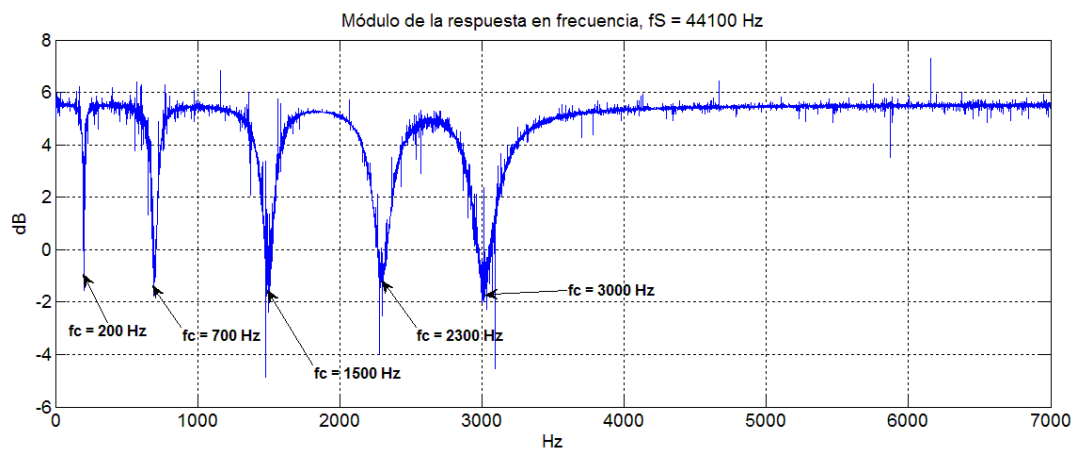
Estos dos parámetros son las ganancias que corresponden a la señal que ha pasado por los filtros de banda eliminada y a la señal original respectivamente.

También se ha usado el parámetro  $Q$  que es la relación entre la frecuencia central y el ancho de banda ( $\frac{\text{Frecuencia central}}{\text{Ancho de banda}}$ ), cuyo valor es 10 para el análisis.

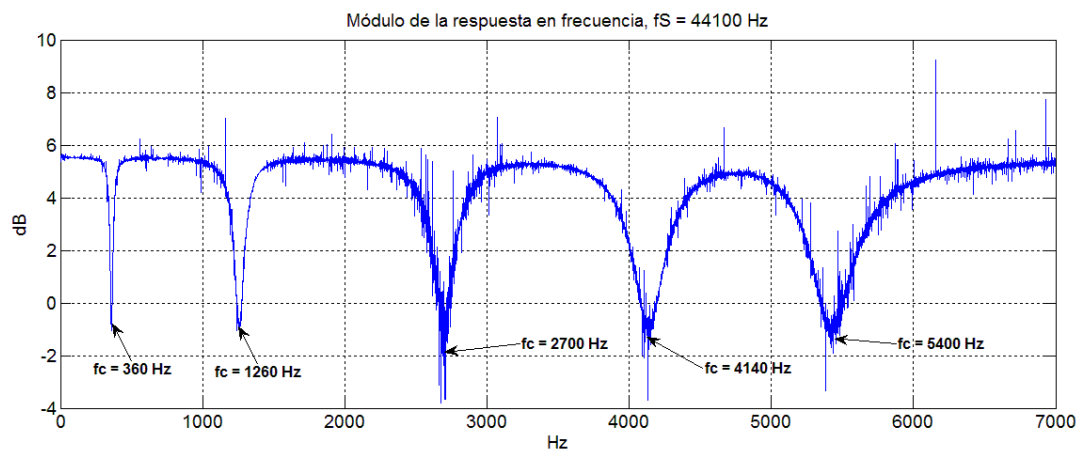
En el análisis se han capturado tres imágenes del módulo de la respuesta en frecuencia que corresponden a la frecuencia máxima y mínima que alcanzan las señales moduladoras y la frecuencia central, es decir, se trata de la respuesta en frecuencia en módulo en tres momentos del filtro variables en el tiempo.



**Figura 3-10: Módulo de la respuesta en frecuencia correspondiente a la frecuencia mínima de la señal moduladora**



**Figura 3-11: Módulo de la respuesta en frecuencia correspondiente a la frecuencia central de la señal moduladora**



**Figura 3-12: Módulo de la respuesta en frecuencia correspondiente a la frecuencia máxima de la señal moduladora**

En cada una de las figuras anteriores (3-10, 3-11 y 3-12) se observa como aparecen *notches* en las frecuencias correspondientes. En cada frecuencia además se observa que el ancho de banda es distinto, esto se debe al parámetro  $Q$ , ya que al mantenerlo fijo y variar la

frecuencia central, máxima o mínima, el ancho de banda es variable y aumenta con la frecuencia central de cada filtro.

Los picos ruidosos que se generan en los módulos de la respuesta en frecuencia se deben a la imprecisión del cálculo del módulo de la respuesta en frecuencia con la herramienta Matlab™.

### 3.2.2 Phaser mediante filtros paso todo

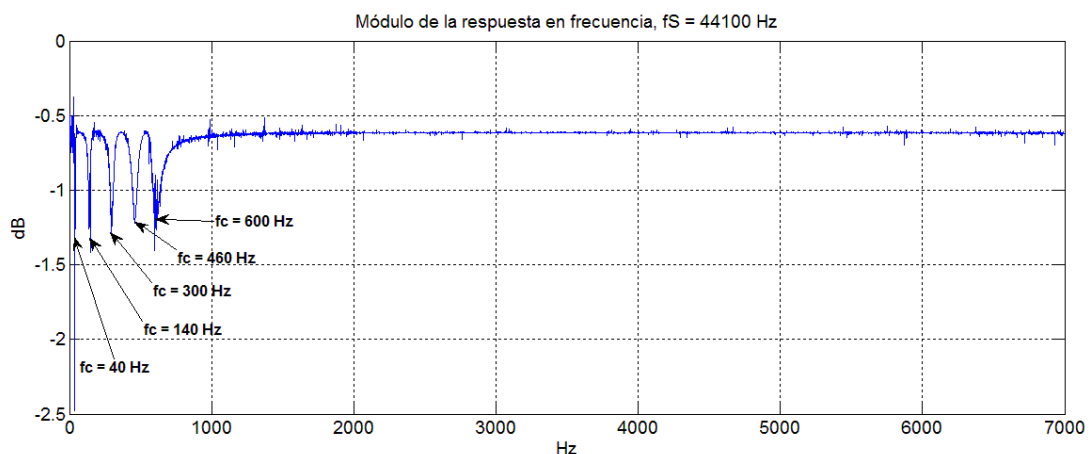
Esta implementación se ha basado en el diagrama de la figura 2-3, usando cinco filtros en lugar de tres.

Como en el caso anterior, la implementación basada en filtros de banda eliminada, en esta implementación existen parámetros ya explicados (frecuencias centrales, *rate*, factor Q y coeficiente de modulación). Estos parámetros son:

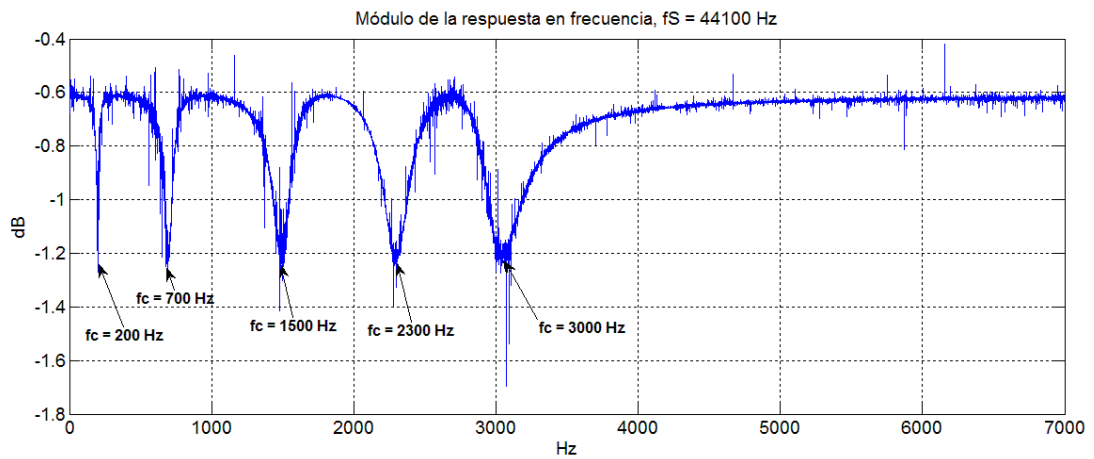
- $d = 0.9$
- $e = 0.99$
- $fb = 0.99$

Estos parámetros son las ganancias que corresponden a la señal original, la señal en la que se han aplicado los filtros paso todo y la señal de realimentación.

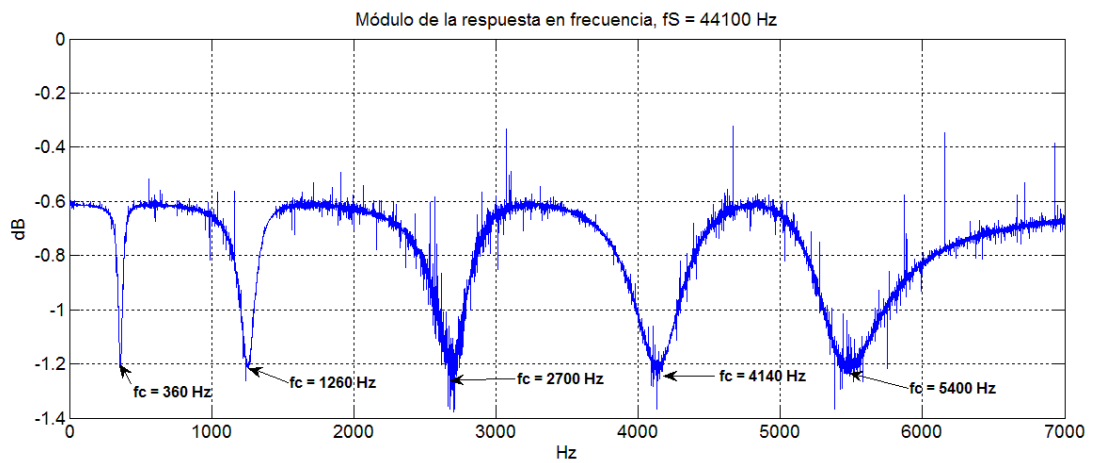
Para el análisis se han capturado tres imágenes del módulo de la respuesta en frecuencia que corresponden a la frecuencia máxima y mínima que alcanzan las señales moduladoras y la frecuencia central como en el caso anterior, es decir, se presentan las respuestas en frecuencia en módulo del filtro variable en tres momentos en el tiempo.



**Figura 3-13: Módulo de la respuesta en frecuencia correspondiente a la frecuencia mínima de la señal moduladora**



**Figura 3-14: Módulo de la respuesta en frecuencia correspondiente a la frecuencia central de la señal moduladora**



**Figura 3-15: Módulo de la respuesta en frecuencia correspondiente a la frecuencia máxima de la señal moduladora**

En las figuras 3-13, 3-14 y 3-15 se puede observar como en las frecuencias deseadas se han generado *notches*.



## 4 Análisis de efectos de audio digital de Reaper™

### 4.1 ReaEQ

#### 4.1.1 ReaEQ: Explicación

ReaEQ es uno de los ecualizadores de Reaper™. ReaEQ tiene por defecto cuatro bandas, pero se pueden añadir más bandas o eliminar algunas de ellas. Usando las bandas por defecto de ReaEQ se pueden ver los filtros *Shelving* y *Peak* como en la figura 2-4.

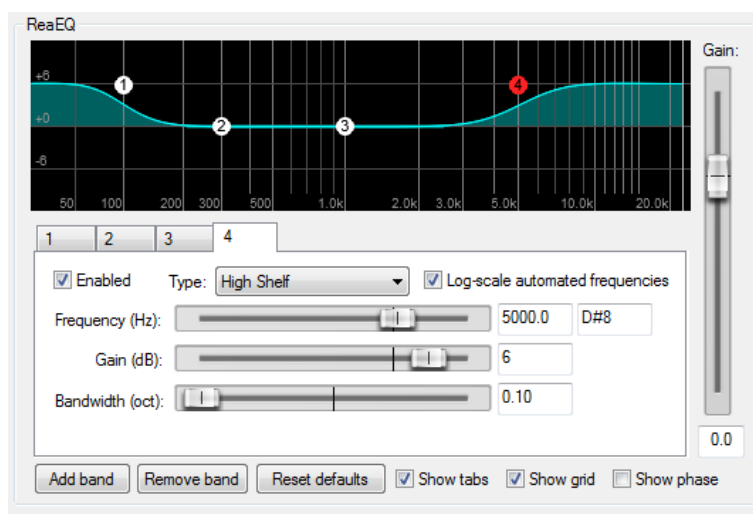


Figura 4-1: Ejemplo de filtros *Shelving* en el efecto ReaEQ de Reaper™

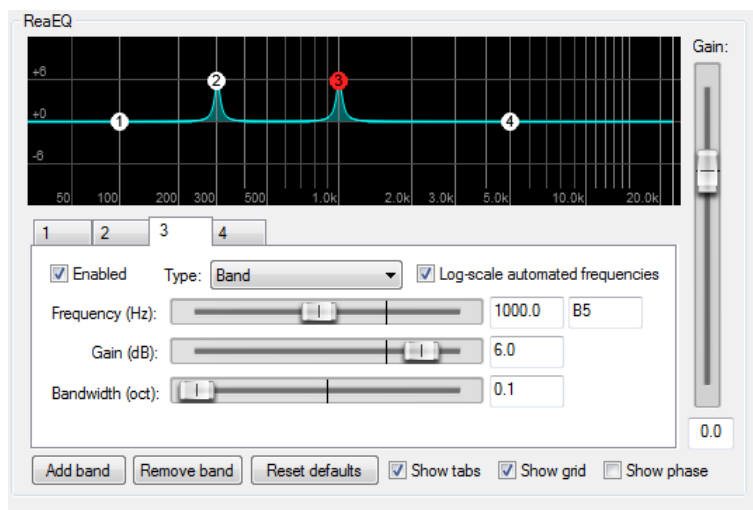


Figura 4-2: Ejemplo de filtros *Peak* en el efecto ReaEQ de Reaper™

ReaEQ tiene tres parámetros ajustables para cada filtro, la frecuencia central (Hz) de cada filtro, la ganancia (dB) de cada filtro y el ancho de banda (en octavas) que habrá en cada filtro. Al tener tres parámetros ajustables (fc, BW y ganancia), ReaEQ es un ecualizador paramétrico.

#### 4.1.2 ReaEQ: Análisis

El análisis se basa en observar el módulo de la respuesta en frecuencia de cada filtro por separado ajustando el ancho de banda a 0.1 octavas, frecuencias centrales de 100 Hz, 300 Hz, 1 kHz y 5 kHz, y aplicando una ganancia de  $\pm 6$  dB.

El módulo de la respuesta en frecuencia se obtiene dividiendo la transformada de Fourier de la salida (señal filtrada) entre la transformada de Fourier de la entrada (señal original). Después el módulo se expresa en decibelios 8dB con referencia 0 dB igual a la que establece Reaper™. Es decir, el proceso es:

$$X(j\Omega) = \text{FT}(x(t)); Y(j\Omega) = \text{FT}(y(t)); \quad (11)$$

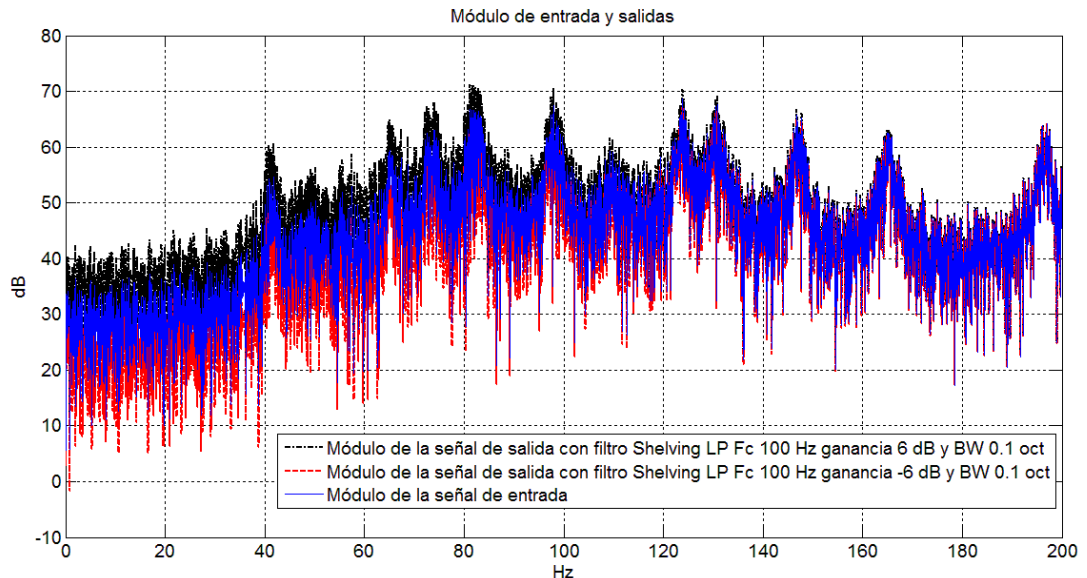
$$H(j\Omega) = Y(j\Omega)/X(j\Omega) \quad (12)$$

$$|H(j\Omega)|(\text{dB}) = 20\log |H(j\Omega)| \quad (13)$$

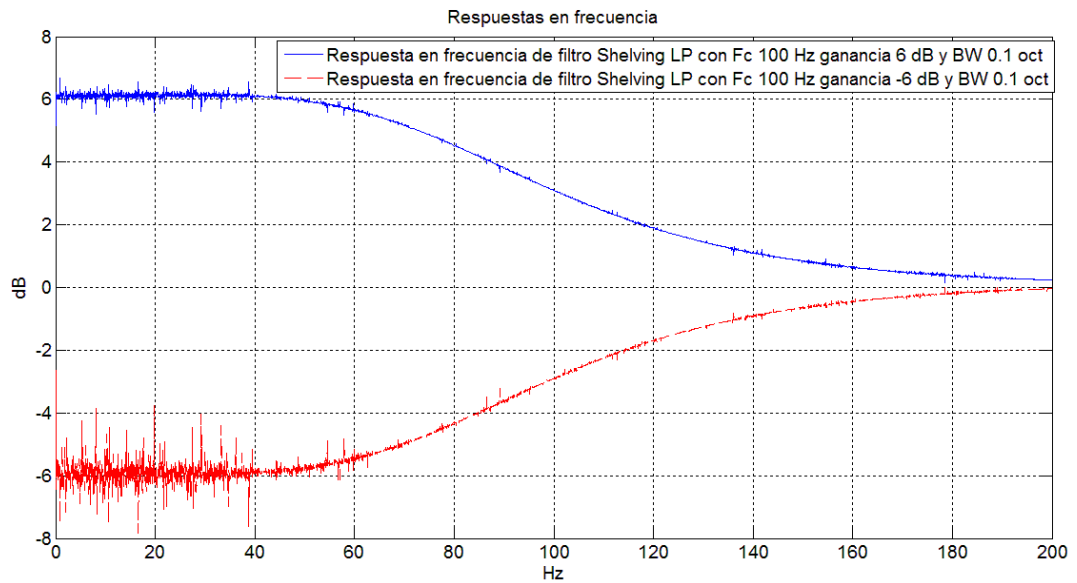
Para el análisis se usa la canción “*Blood Brothers*” del grupo *Iron Maiden* debido a que es una canción que contiene instrumentos presentes en todo el espectro de frecuencia.

Aplicando cada filtro por separado al audio original se obtiene:

- Filtro *Shelving* paso bajo (*Low Pass*, LP) con  $f_c = 100$  Hz



**Figura 4-3: Módulo de la señal de entrada en frecuencia (azul sólido), módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Shelving* LP de  $f_c$  100 Hz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (Negro punto y raya) y módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Shelving* LP de  $f_c$  100 Hz ganancia -6 dB y BW 0.1 (rojo rayas)**



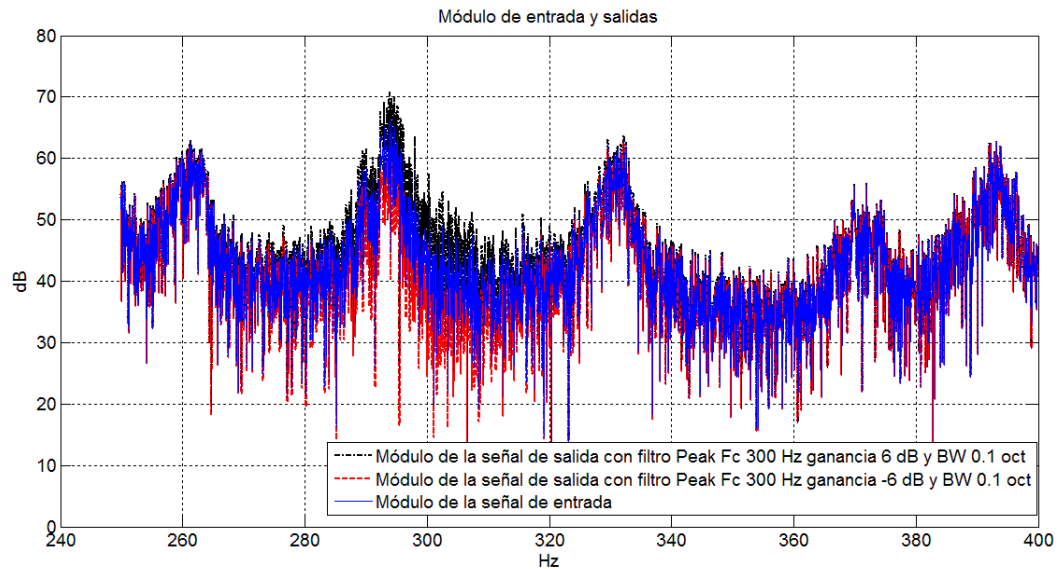
**Figura 4-4: Módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Shelving* LP con  $f_c$  100 Hz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (azul sólido) y módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Shelving* LP con  $f_c$  100 Hz ganancia -6 dB y BW 0.1 oct (rojo rayas).**

En la figura 4-3 se aprecia desde 0 Hz hasta los 150 Hz el efecto del filtro *Shelving*, a partir de los 150 Hz la respuesta en frecuencia de las tres señales va siendo cada vez más parecida debido a que los filtros van aproximándose a ganancia unidad.

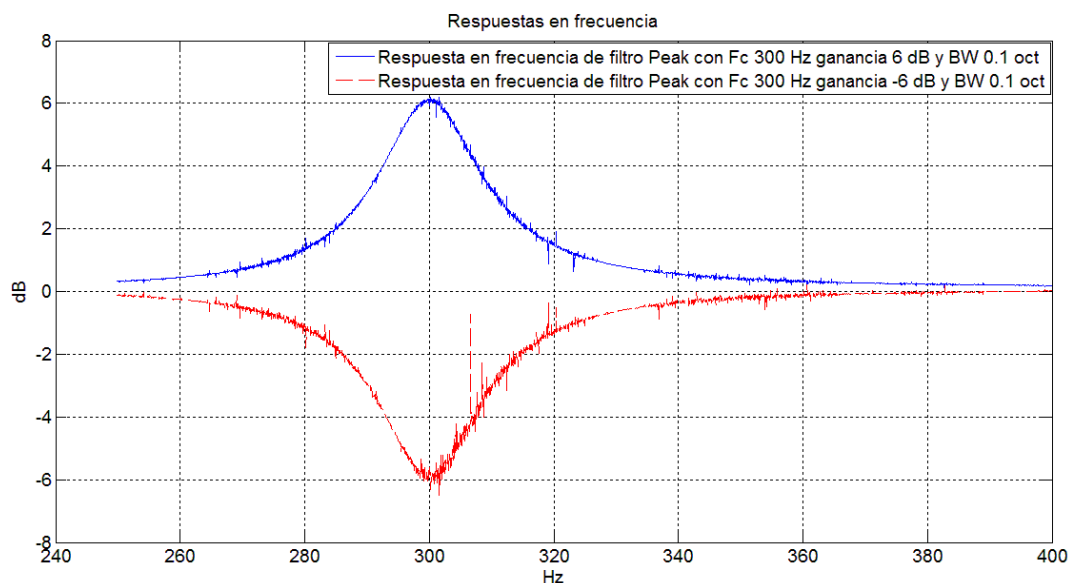
Esto se ve con mucha más claridad en los módulos de las respuestas en frecuencia (figura 4-4), que tiene la misma forma que en ReaEQ.

En los módulos de las respuestas en frecuencia se observa una especie de ruido, este ruido es debido a la estimación del módulo de la respuesta en frecuencia al aplicar las fórmulas 11,12 y 13 en la herramienta Matlab™. Este ruido es más notable en las zonas de baja energía.

- Filtro *Peak* con  $f_c = 300$  Hz



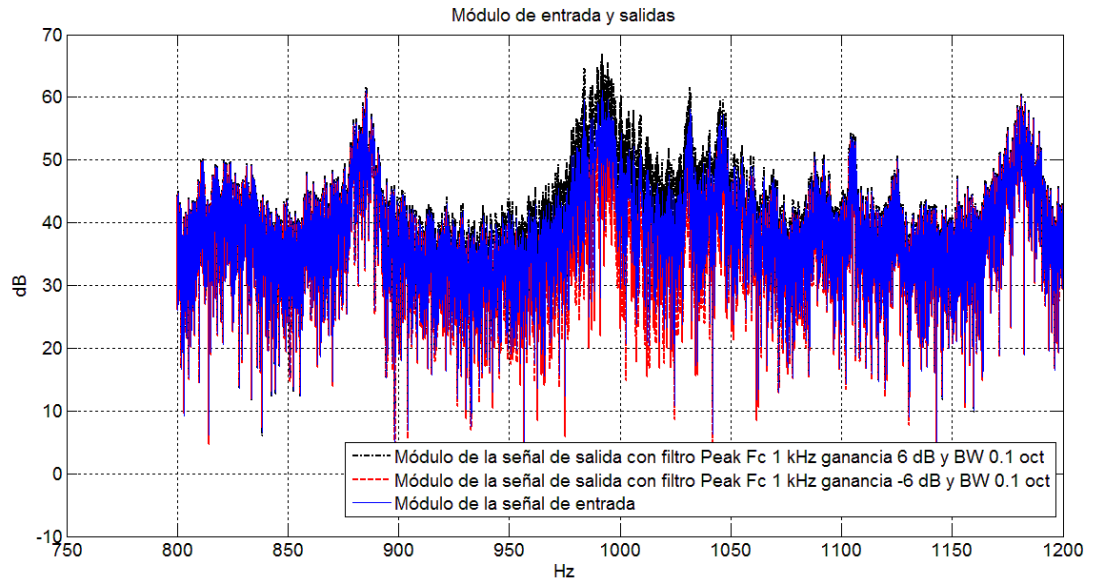
**Figura 4-5:** Módulo de la señal de entrada en frecuencia (azul sólido), módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Peak* de  $f_c$  300 Hz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (Negro punto y raya) y módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Peak* de  $f_c$  300 Hz ganancia -6 dB y BW 0.1 (rojo rayas)



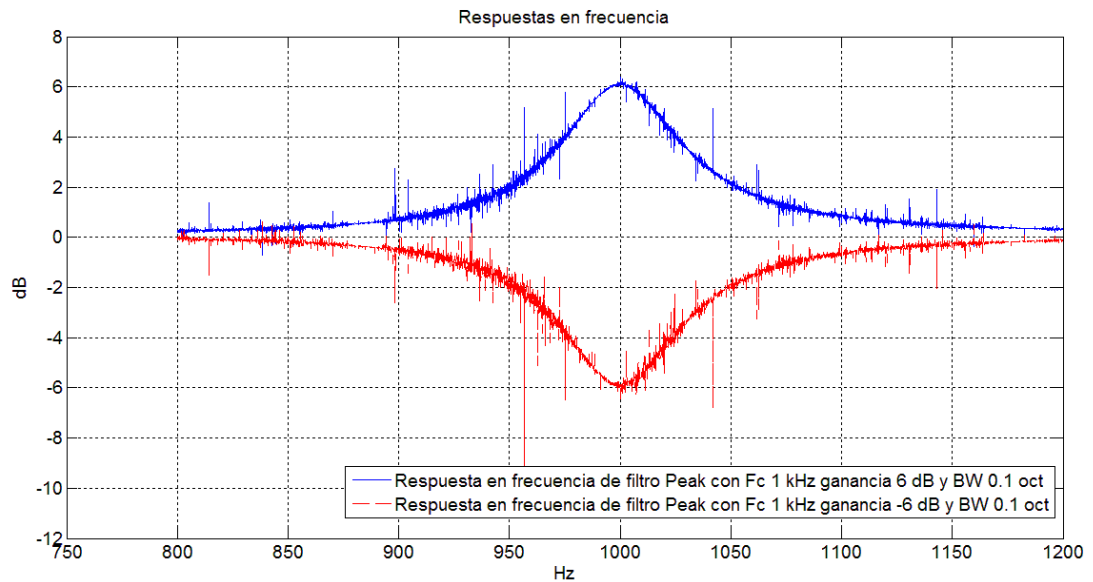
**Figura 4-6:** Módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Peak* con  $f_c$  300 Hz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (azul sólido) y módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Peak* con  $f_c$  300 Hz ganancia -6 dB y BW 0.1 oct (rojo rayas).

En la figura 4-5 se observa el efecto del filtro *Peak* entre los 280 Hz y los 320 Hz, a partir de estas frecuencias, el filtro *Peak* va convergiendo a 0 dB y disipando su efecto. El módulo de la respuesta en frecuencia con ganancia -6 dB tiene un pico cercano a 310 Hz debido a la inestabilidad del cálculo del módulo de la respuesta en frecuencia con Matlab™.

- Filtro *Peak* con  $f_c = 1$  kHz



**Figura 4-7:** Módulo de la señal de entrada en frecuencia (azul sólido), módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Peak* de  $f_c$  1 kHz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (Negro punto y raya) y módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Peak* de  $f_c$  1 kHz ganancia -6 dB y BW 0.1 (rojo rayas)

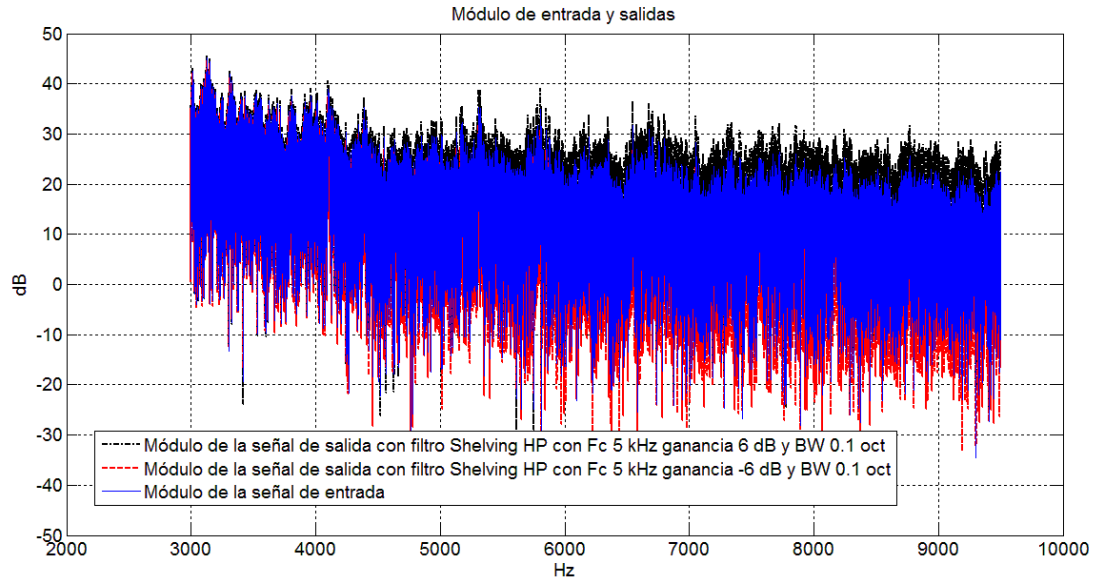


**Figura 4-8:** Módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Peak* con  $f_c$  1 kHz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (azul sólido) y módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Peak* con  $f_c$  1 kHz ganancia -6 dB y BW 0.1 oct (rojo rayas).

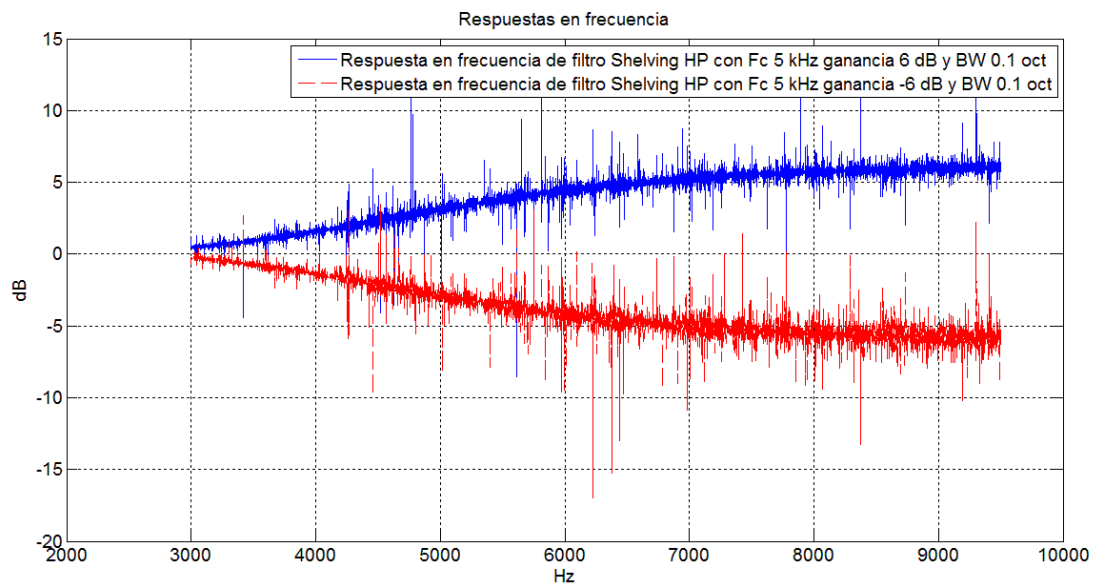
El efecto del filtro visto en la figura 4-7 es el mismo que en el visto en la figura 4-5, esto se debe a que se aplica el mismo tipo de filtro, pero con frecuencias de resonancia distintas. Al tener distintas frecuencias de resonancia, el ancho de banda es totalmente distinto debido a que el ancho de banda se está midiendo en octavas. En esta frecuencia las señales

tienen menor energía y al calcular la estimación del módulo de la respuesta en frecuencia genera inestabilidad que es visible en forma de picos (figura 4-8).

- Filtro *Shelving* paso alto (*High Pass*, hP) con  $f_c = 5$  kHz



**Figura 4-9:** Módulo de la señal de entrada en frecuencia (azul sólido), módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Shelving* HP de  $f_c$  5 kHz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (Negro punto y raya) y módulo de la señal de salida en frecuencia con filtro *Shelving* HP de  $f_c$  5 kHz ganancia -6 dB y BW 0.1 (rojo rayas)



**Figura 4-10:** Módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Shelving* HP con  $f_c$  5 kHz ganancia 6 dB y BW 0.1 oct (azul sólido) y módulo de la respuesta en frecuencia del filtro *Shelving* HP con  $f_c$  5 kHz ganancia -6 dB y BW 0.1 oct (rojo rayas).

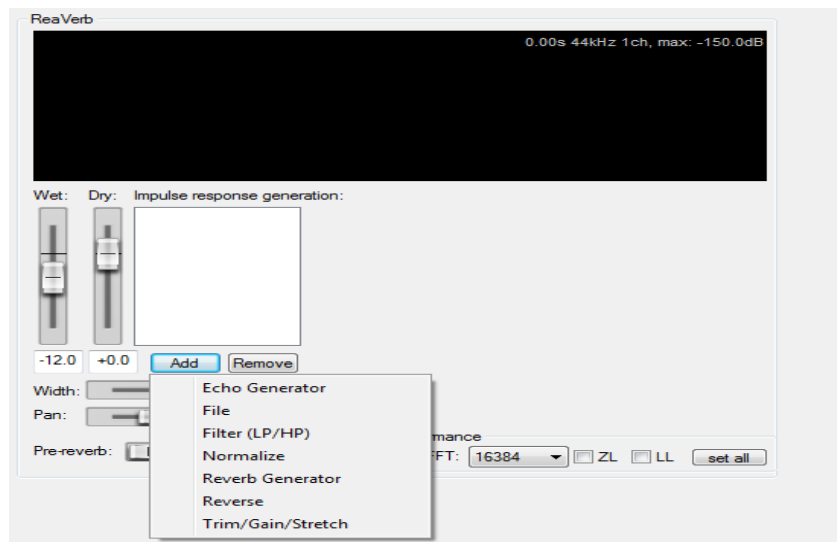
A alta frecuencia las señales de entrada y de salida tienen una energía muy baja, por lo que al hacer la estimación del módulo de la respuesta en frecuencia en Matlab™ se genera la

inestabilidad. Aun así, se observa claramente la respuesta en frecuencia de un filtro *Shelving HP*.

## 4.2 ReaVerb

### 4.2.1 ReaVerb: Explicación

La herramienta Reaper™ tiene el *plug-in* ReaVerb que permite añadir el efecto de reverberación a cualquier archivo de audio.

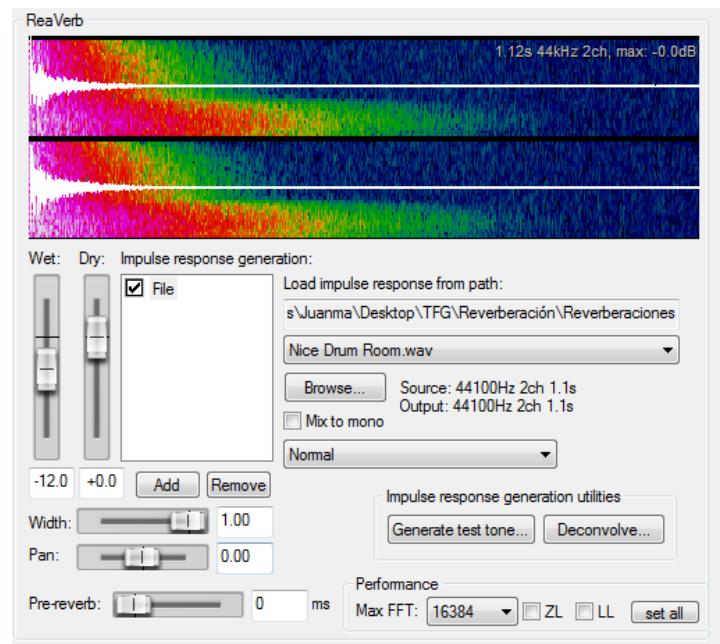


**Figura 4-11: Menú de ReaVerb con las distintas opciones de reverberación**

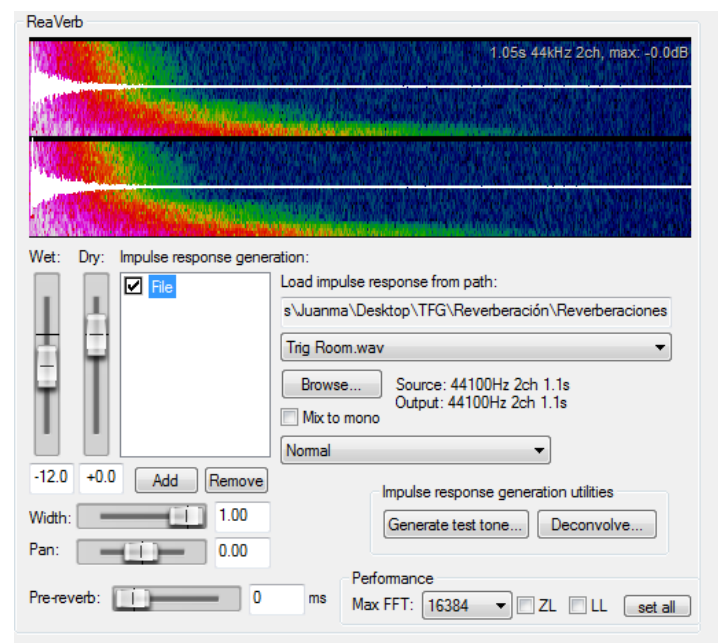
Según lo que se observa en esta figura, el *plug-in* ReaVerb contiene diversas opciones para añadir reverberación a un audio. Estas opciones son: generador de eco, archivo de audio, filtro paso bajo / paso alto, normalización, generador de reverberación, invertir, recortar/ganancia/estiramiento.

ReaVerb permite cadenas en la reverberación, es decir, se pueden combinar las anteriormente mencionadas opciones para generar a partir del archivo de audio una reverberación más real o más compleja.

Para el análisis de la reverberación se ha elegido la opción de archivo de audio (*file*), ya que es más sencilla y didáctica porque se basa en la convolución de la señal de audio con la respuesta al impulso almacenada en el fichero de audio (*file*). Se han usado dos archivos distintos que modelan la respuesta al impulso de salas diferentes: *Nice Drum Room* y *Trig Room*.



**Figura 4-12:** Forma de la reverberación del archivo *Nice Drum Room* en el *plug-in* ReaVerb



**Figura 4-13:** Forma de la reverberación del archivo *Trig Room* en el *plug-in* ReaVerb

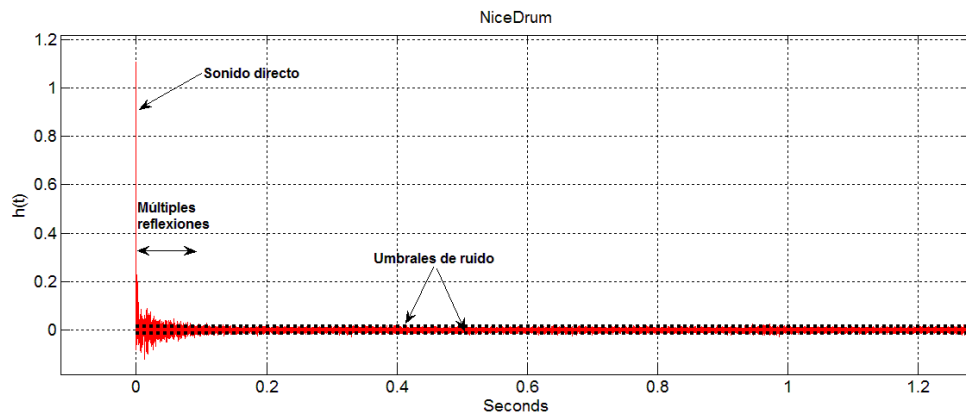
## 4.2.2 ReaVerb: Análisis

El análisis se basa en identificar las zonas de reverberación (sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías) en la respuesta al impulso.

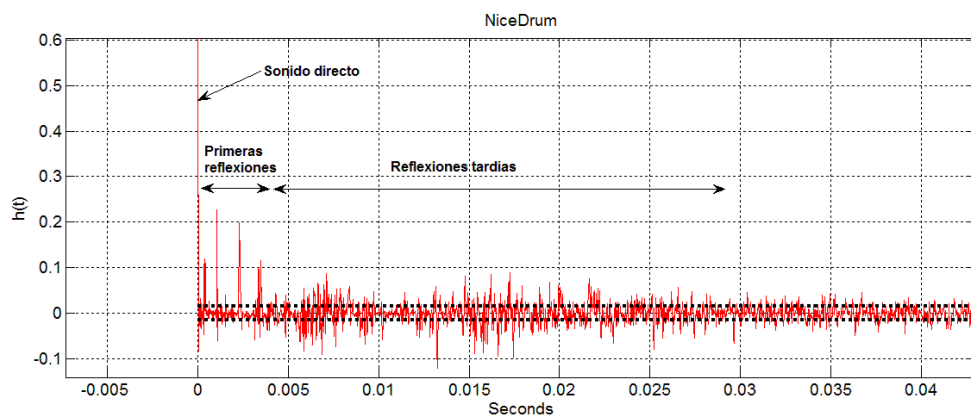
En el análisis se usa la respuesta al impulso debido a que es una señal que contiene la información de las propiedades acústicas de la sala.

A parte de los archivos de audio que contienen la reverberación, el archivo de audio a analizar ha sido una voz femenina cantando unos segundos obtenido de la página [www.sampleswap.org](http://www.sampleswap.org)

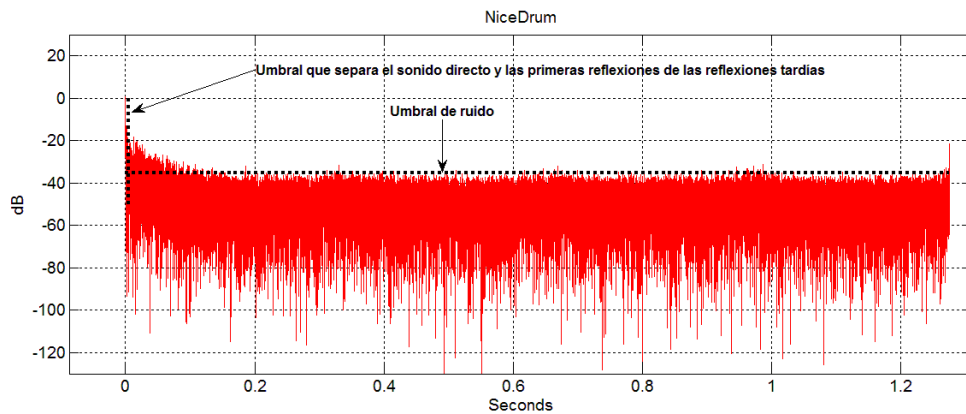




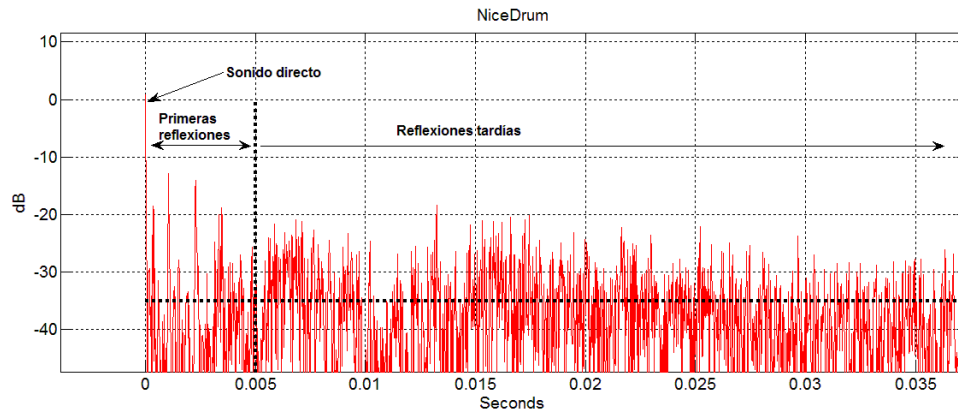
**Figura 4-14:** Respuesta al impulso del archivo *Nice Drum Room*



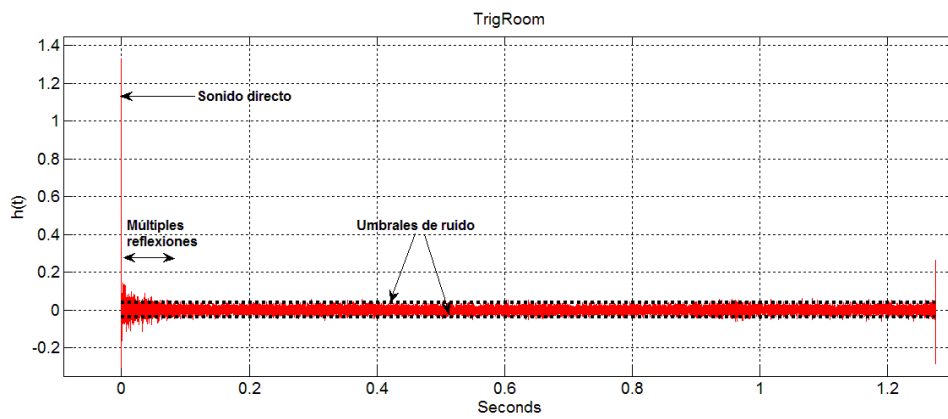
**Figura 4-15:** Respuesta al impulso del archivo *Nice Drum Room* en detalle donde se observa el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías



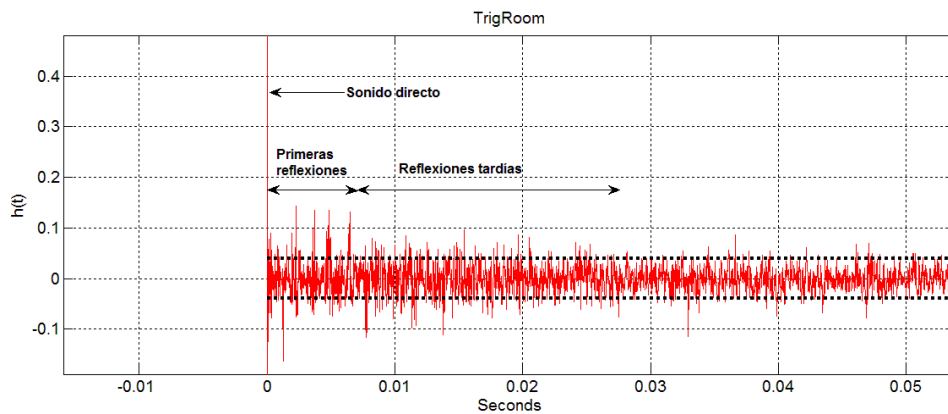
**Figura 4-16:** Módulo de la respuesta al impulso en dB del archivo *Nice Drum Room*



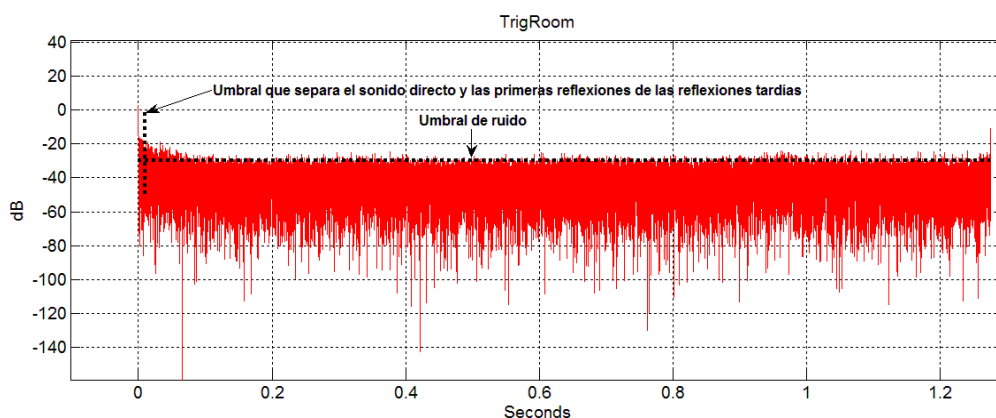
**Figura 4-17:** Módulo de la respuesta al impulso en dB del archivo *Nice Drum Room* en detalle donde se observa el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías



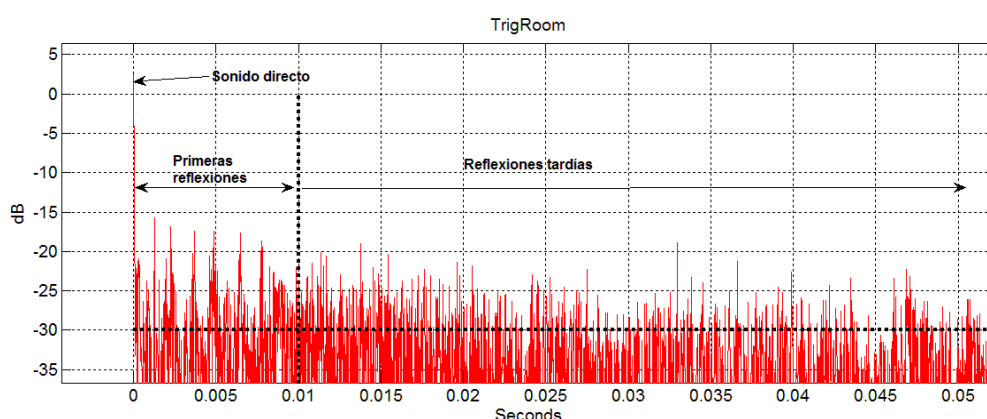
**Figura 4-18:** Respuesta al impulso del archivo *Trig Room*



**Figura 4-19:** Respuesta al impulso del archivo *Trig Room* en detalle donde se puede ver el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías



**Figura 4-20: Módulo de la respuesta al impulso en dB del archivo *Trig Room***



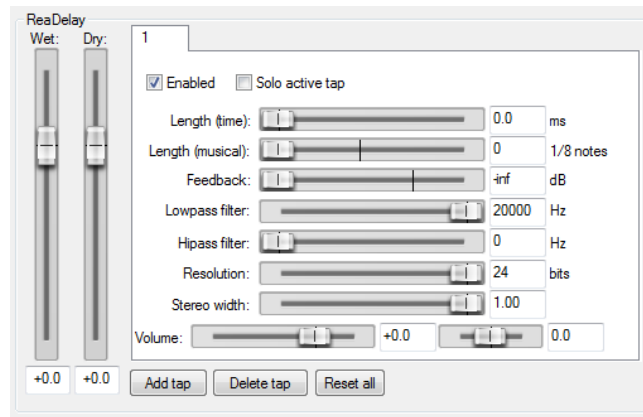
**Figura 4-21: Módulo de la respuesta al impulso en dB del archivo *Trig Room* en detalle donde se observa el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías**

Se puede observar que en todas las figuras que están en detalle (4-15, 4-17, 4-19, 4-21) tanto el sonido directo, que es el sonido que llega al receptor directamente desde el emisor, las primeras reflexiones, que corresponden a reflexiones en el techo, suelo o pared, y las reflexiones tardías, que son aquellas que llegan al receptor tras múltiples reflexiones de las múltiples reflexiones que se producen en la sala.

## 4.3 ReaDelay

### 4.3.1 ReaDelay: Explicación

Reaper™ tiene el *plug-in* ReaDelay que permite generar un retardo en la señal original.



**Figura 4-22: Ejemplo del *plug-in* ReaDelay de Reaper™**

Los dos parámetros fundamentales son *length (time)* y *length (musical)* que permiten elegir el tamaño del retardo tanto en milisegundos como en octavas.

Los parámetros *Wet* y *Dry* permiten aumentar o disminuir la ganancia de la señal procesada y sin procesar respectivamente.

Para el análisis de ReaDelay sólo se usa el retardo en ms, el resto de parámetros se mantienen por defecto.

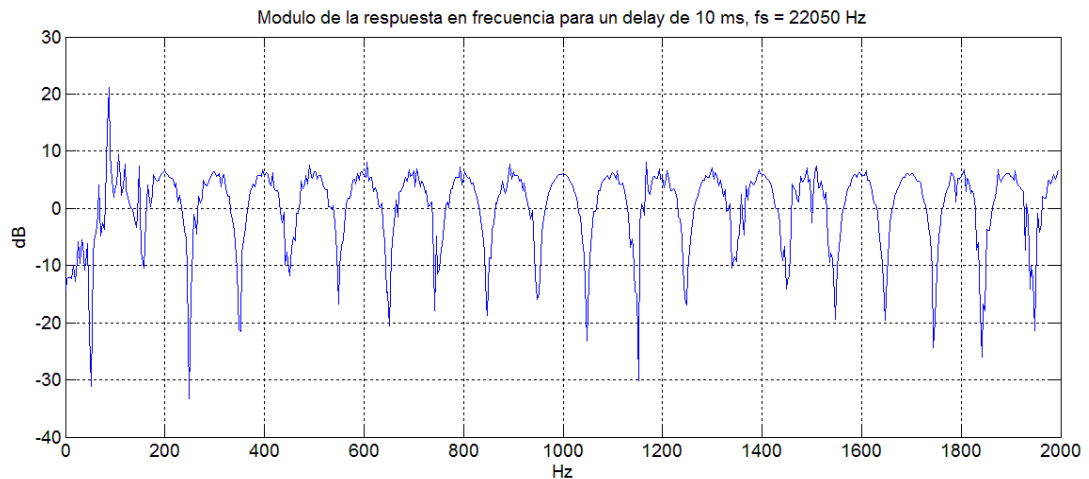
### 4.3.2 ReaDelay: Análisis

Para el análisis de ReaDelay se ha elegido una grabación de voz del tutor de este TFG, Daniel Ramos Castro.

Además, se ha trabajado con dos retardos distintos, 10 ms y 30 ms. Con estos retardos se generan filtros de peine FIR, filtros que interesan para el análisis.

Para ver en detalle el filtro de peine, se escogen los primeros 2 kHz del módulo de la respuesta en frecuencia:

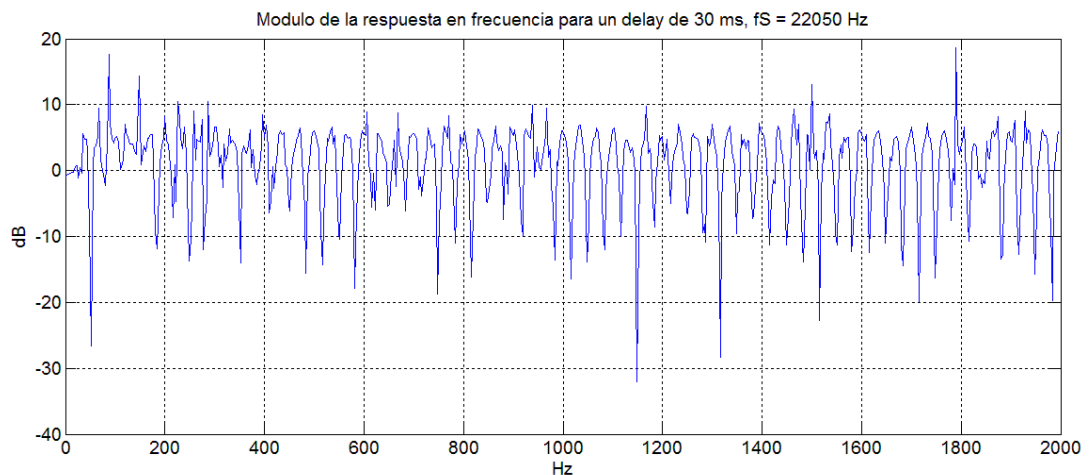
- Retardo = 10 ms



**Figura 4-23: Módulo de la respuesta en frecuencia del efecto ReaDelay con un retardo de 10 ms**

En esta imagen se observa el efecto del filtro FIR pero con ciertos picos que significan inestabilidad en la señal, esto se debe a la imprecisión al calcular la respuesta en frecuencia con Matlab™.

- Retardo = 30 ms

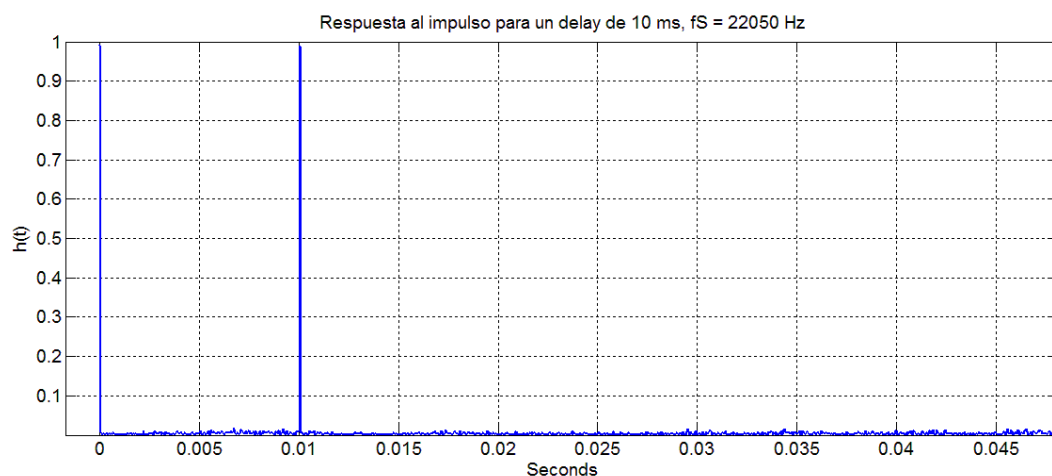


**Figura 4-24: Módulo de la respuesta en frecuencia del efecto ReaDelay con un retardo de 30 ms**

Se puede ver que existen también picos debidos a la imprecisión del cálculo de la respuesta en frecuencia con Matlab™. A diferencia de la figura 4-23, esta figura muestra más ceros en el mismo intervalo de frecuencia, esto es porque se generan más ceros debido al aumento del retardo, el número de ceros es el número de muestras del retardo, por lo que a más retardo más ceros.

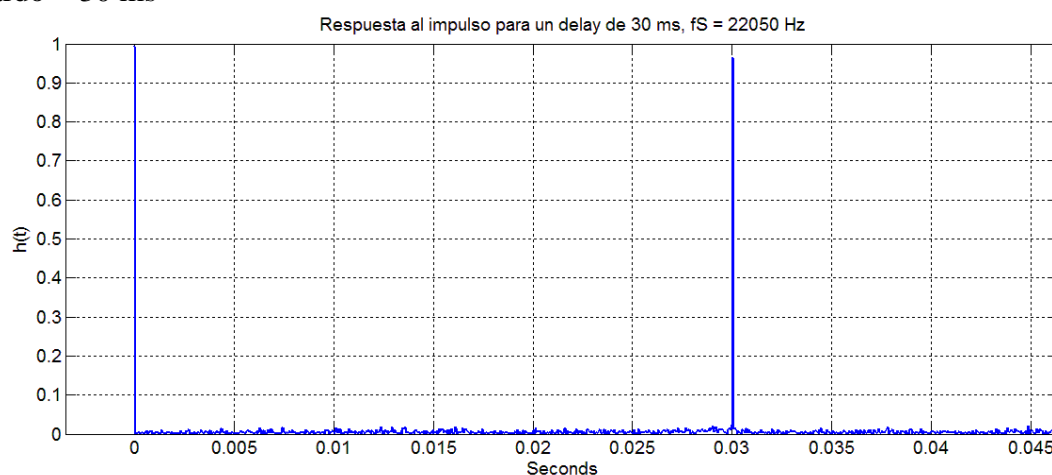
Para concluir el análisis se va a observar la respuesta al impulso de los dos casos anteriores en un intervalo de 45 ms para verlo en detalle.

- Retardo = 10 ms



**Figura 4-25: Respuesta al impulso del efecto ReaDelay con un retardo de 10 ms**

- Retardo = 30 ms



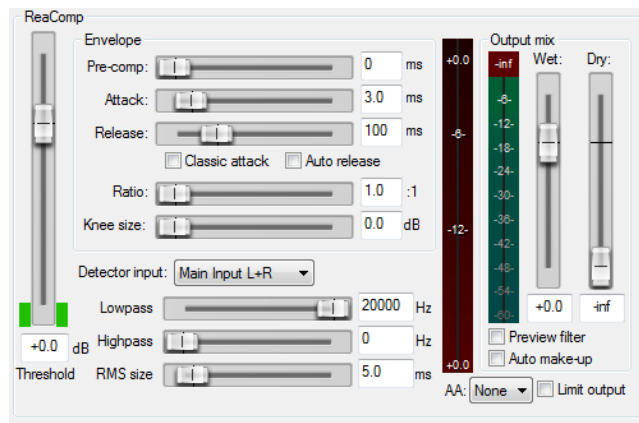
**Figura 4-26: Respuesta al impulso del efecto ReaDelay con un retardo de 30 ms**

En ambas figuras se observa una delta en el origen correspondiente a la señal original, en la figura 4-25 se observa una delta en 10 ms que corresponde a la señal con el retardo y en la figura 4-26 se observa esta segunda delta en 30 ms correspondiente a la señal con el retardo. La amplitud de todas las deltas es la misma debido a que los parámetros *Wet* y *Dry* se mantienen por defecto al mismo nivel, 0 dB.

## 4.4 ReaComp

### 4.4.1 ReaComp: Explicación

ReaComp es un compresor de Reaper™ que permite controlar el nivel de volumen y controlar la dinámica.



**Figura 4-27: Ejemplo de ReaComp en Reaper™**

ReaComp tiene cuatro parámetros esenciales para entender cómo usar la compresión, definidos en su manual de usuario [2]:

- *Threshold*: determina el volumen donde empezará a actuar el compresor.
- *Ratio*: determina el grado de compresión.
- *Gain*: determina el ajuste de volumen de la pista cuando se ha realizado la compresión.
- *Limit Output*: evita que la salida del compresor sobrepase los 0 dB.

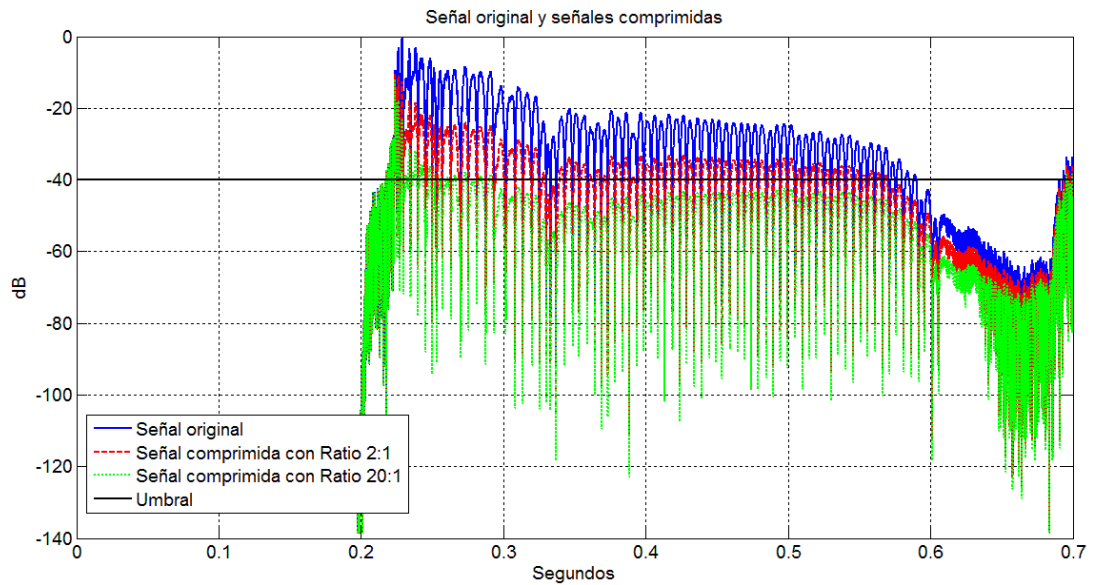
El resto de parámetros no se usan en este análisis por lo que sus valores quedan definidos por defecto.

#### 4.4.2 ReaComp: Análisis

Para el análisis de este efecto se utiliza la canción “*Greyhound*” del grupo *Swedish House Mafia* debido a que tiene un nivel muy alto, cercano a la referencia de 0 dB de Reaper™ que facilita el análisis del efecto.

Los parámetros ajustados para este análisis son -40 dB de *Threshold*, dos *ratios* distintos, 2:1 y 20:1, para observar las diferencias entre compresor y limitador. Los tiempos de *attack* y *reléase* se mantienen por defecto.

Para el análisis de ReaComp elegimos los primeros 700 ms de las señales, que permiten ver el inicio, como afecta el parámetro *attack* y el parámetro *reléase*.

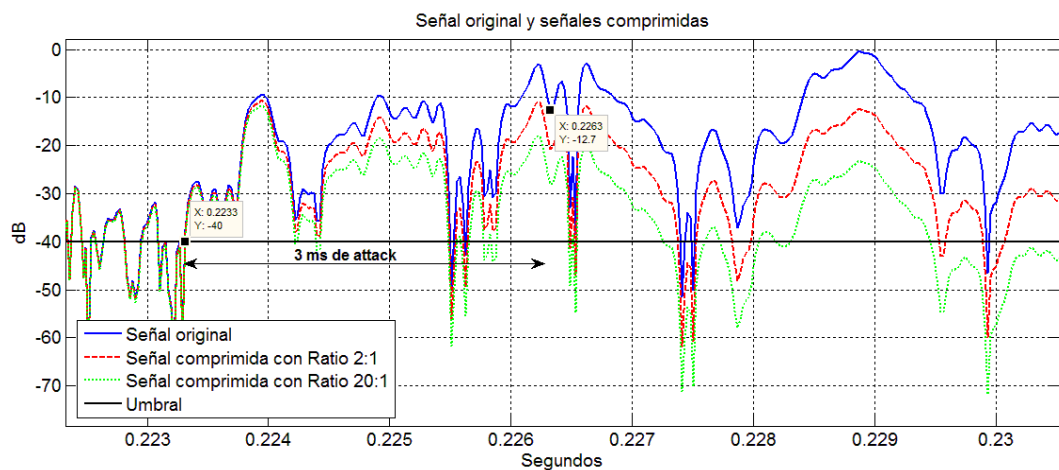


**Figura 4-28: Señal original (azul sólido), señal comprimida con ratio 2:1 y umbral -40 dB (rojo rayas), señal comprimida con ratio 20:1 y umbral -40 dB (verde punteada) y umbral de -40 dB (negro sólido)**

En esta figura se observa cómo al inicio, las tres señales están por debajo del umbral y sus valores coinciden. Cuando la señal original sobrepasa el umbral hacen falta 3 ms (tiempo de *attack*) para que el compresor actúe. La señal original antes de los 600 ms está por debajo del umbral y tras 100 ms (tiempo de *reléase*) las tres señales vuelven a coincidir.

Para ver esto mejor, se presentan en detalles distintas partes de la señal.

#### - *Attack*

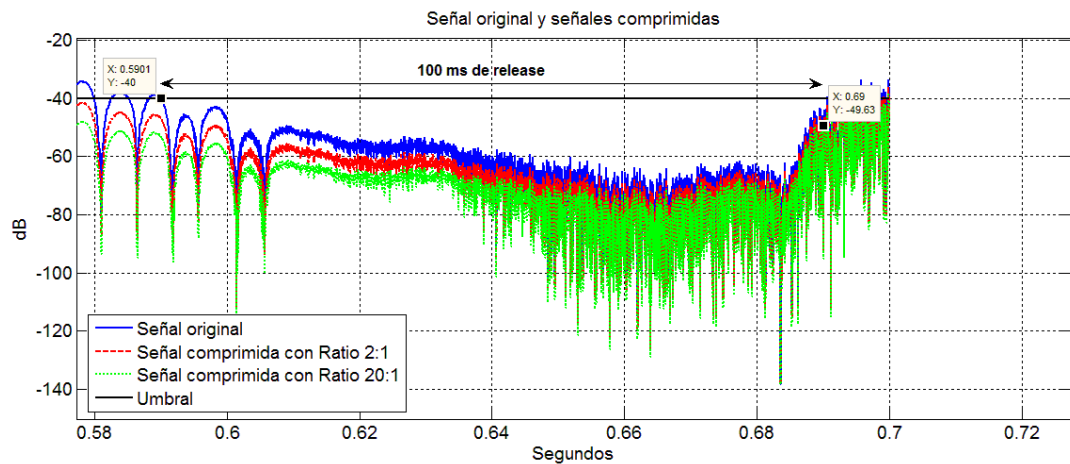


**Figura 4-29: Detalle de la figura 4-28 para observar e tiempo de *Attack***

En esta figura se observa como la señal original sobrepasa el umbral y tarda 3 ms en que se haga presente la compresión. Donde es más notable es en los 225 ms, donde se distinguen las tres señales por separado.



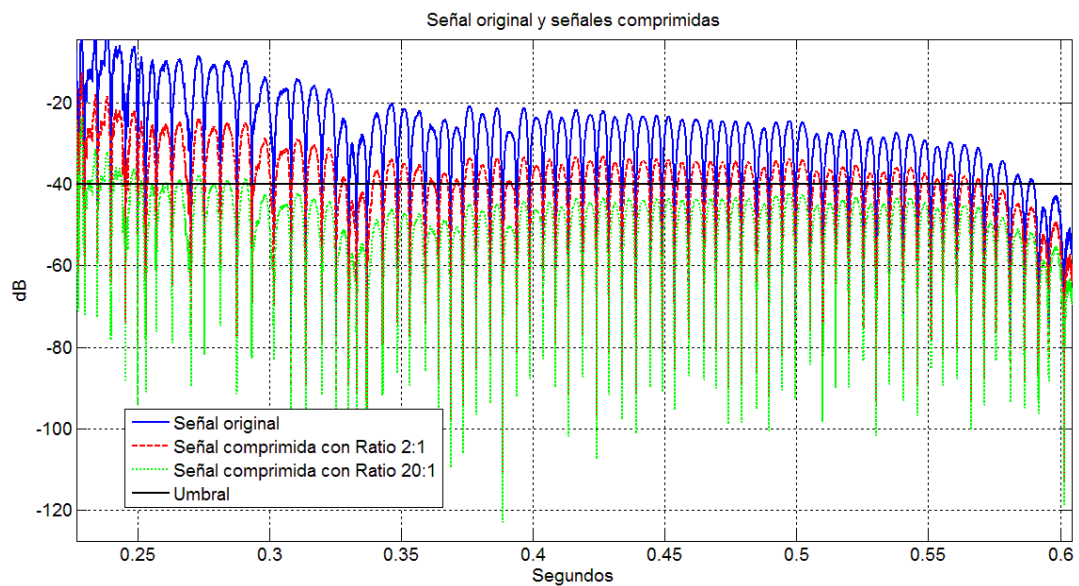
- *Release*



**Figura 4-30: Detalle de la figura 4-28 para observar e tiempo de *Release***

En esta imagen se ve que la señal original tiene valores por encima y por debajo del umbral hasta que finalmente permanece por debajo antes de los 600 ms y 100 ms después (tiempo de *release*) las tres señales terminan convergiendo.

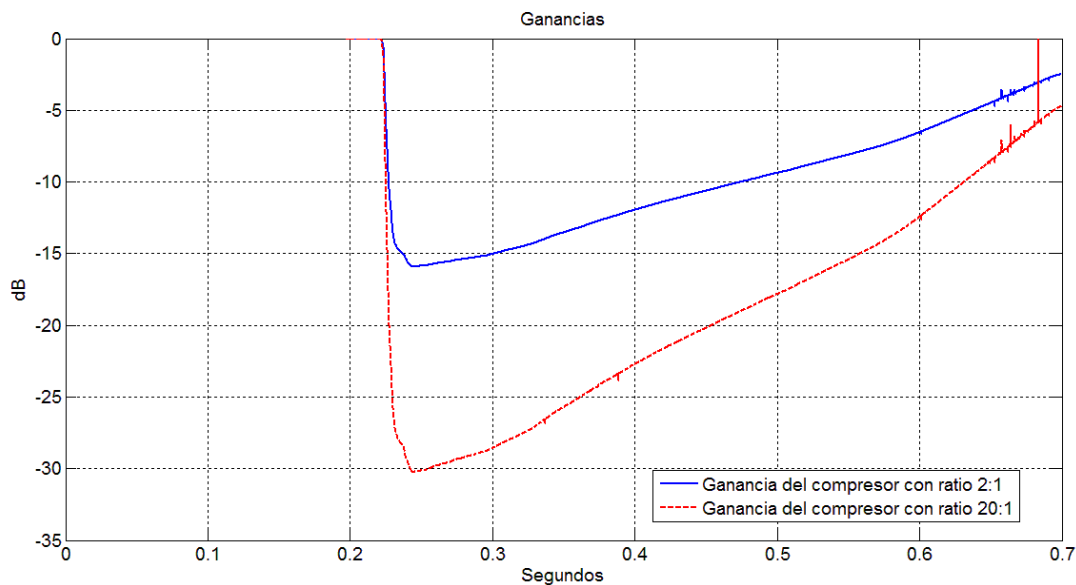
La siguiente figura muestra la diferencia entre compresor y limitador:



**Figura 4-31: Detalle de la figura 4-28 para observar la diferencia entre compresor y limitador**

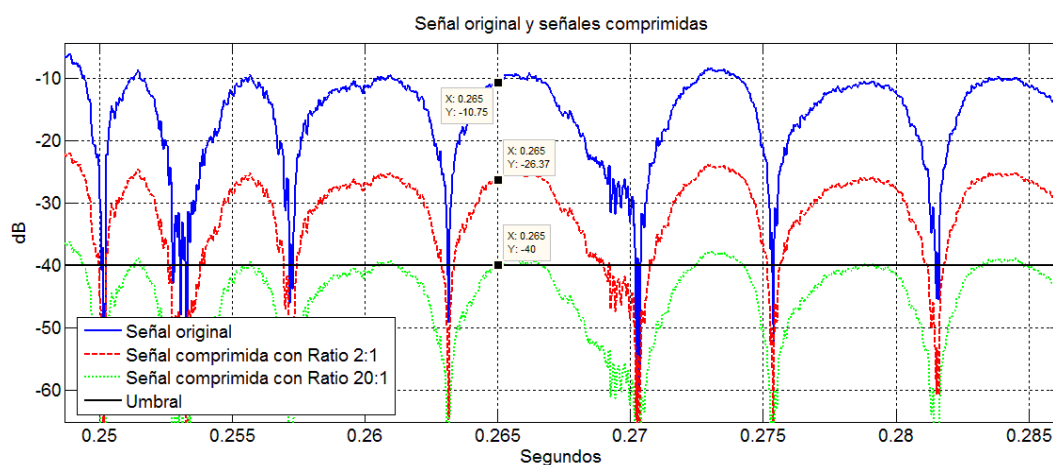
Esta figura muestra la diferencia entre compresor y limitador, es decir, el compresor comprime la señal original a partir de un umbral, pero el limitador limita la señal por debajo de ese umbral, como se puede observar en la figura 4-31.

Para finalizar el análisis de ReaComp, la siguiente figura presenta la ganancia aplicada a la señal de entrada para cada valor de *ratio*:



**Figura 4-32: Ganancia del compresor con un *ratio* de 2:1 (azul sólido) y ganancia del compresor con un *ratio* de 20:1 (rojo rayas)**

Esta figura muestra la forma de la ganancia de un compresor, que siempre es menor o igual a 0 dB. Para entender mejor esta figura hace falta compararla con una imagen en detalle de la figura 4-28.



**Figura 4-33: Detalle de la figura 4-51 para observar las ganancias de los compresores**

Para los valores marcados en 265 ms, donde la señal original tiene un valor de -10 dB aproximadamente, se observa que los valores son los correspondientes a las ganancias de la figura 4-32, para el *ratio* 2:1, la señal tiene una ganancia por debajo de los -15 dB, y en la figura 4-33 la señal tiene un valor de -26 dB aproximadamente. Lo mismo ocurre con la señal de *ratio* 20:1, tiene una ganancia de unos -30 dB y en la figura 4-33 la señal tiene un valor de -40 dB.

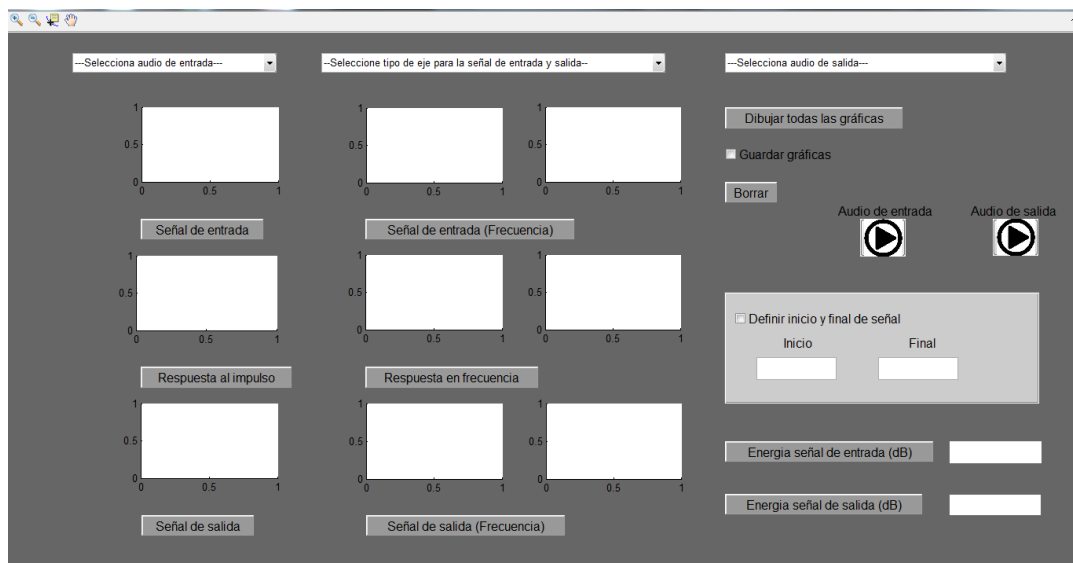
## 5 Interfaz gráfica para el análisis en Matlab™

Esta interfaz gráfica de Matlab™ ha sido implementada para poder hacer un análisis de efectos de audio digitales para las prácticas del laboratorio de la asignatura Tecnologías de Audio.

El funcionamiento de esta GUI se basa en elegir un audio de entrada (audio original), un audio de salida (audio original al que se le ha añadido el efecto que se quiere analizar) y el tipo de eje de las formas de onda (tiempo o muestras).

Tras la elección, se presentan las formas de onda de entrada y de salida. Después cada señal se transforma al dominio de la frecuencia para obtener el módulo y la fase de la respuesta en frecuencia. Una vez obtenido esto se vuelve al dominio del tiempo con una transformación inversa para obtener la respuesta al impulso. Con la respuesta en frecuencia y la respuesta al impulso se puede empezar a hacer un análisis del efecto seleccionado.

Para un análisis más detallado, la GUI contiene distintas opciones como guardar las gráficas, definir un inicio y un final para un análisis a corto plazo, y obtener las energías de las señales de entrada y salida.



**Figura 5-1: Interfaz gráfica implementada en Matlab™**

## 6 Conclusiones y trabajo futuro

---

### 6.1 Conclusiones

A lo largo de este trabajo de fin de grado se han visto los comportamientos de diferentes efectos de audio en la práctica.

Los objetivos inicialmente planteados se han cumplido.

Este TFG abarca tres aspectos interesantes sobre los efectos de audio:

- Adquirir conocimientos suficientes sobre efectos de audio para llegar a implementarlos.
- Adquirir conocimientos sobre el uso de la DAW Reaper™, herramienta útil para uso de efectos de audio digital.
- Adquirir conocimientos sobre cómo actúan los efectos de audio digital en señales de audio tanto en el tiempo como en frecuencia.

### 6.2 Trabajo futuro

A partir del material desarrollado se podría continuar con lo siguiente:

- Implementar otra interfaz gráfica para poder controlar los distintos parámetros de los efectos *flanger* y *phaser* y que, de esta forma, los alumnos lleguen a comprender mejor su funcionamiento.
- Implementar efectos de audio digital de Reaper™ en Matlab™ ya analizados en este TFG como un compresor, un ecualizador o una reverberación.
- Analizar más efectos de Reaper™.

# Referencias

---

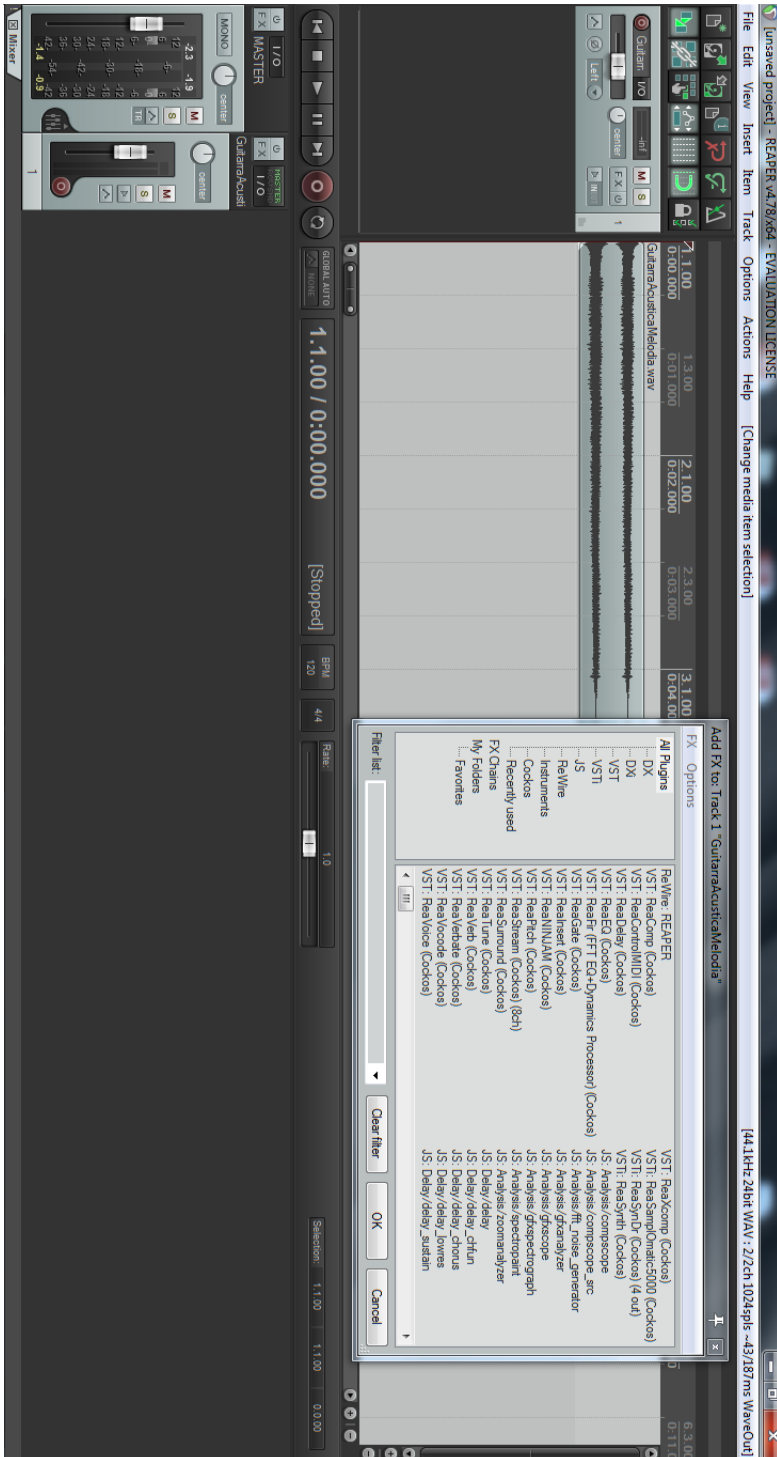
- [1] Zolder, U. (2011). “DAFX: Digital Audio Effects, 2nd Edition”. Wiley.
- [2] Francis, G. (2011). “User Guide”
- [3] Rossing, T. (2007). “Springer Handbook of Acoustics”. Springer.
- [4] Instituto de sonido ECOS. Ecualizadores y filtros. [www.escueladesonido.com.ar](http://www.escueladesonido.com.ar)
- [5] Ramos Castro, D. Tecnologías de Audio. Escuela Politécnica Superior Universidad Autónoma de Madrid.
- [6] Quirante Catalán, C. (2009). Trabajo de fin de carrera: implementación de algoritmos de efectos de audio en un procesador DSP de TI.





---

### ***A Ejemplo de la interfaz de Reaper™***







**B Interfaz gráfica de Matlab™ implementada**

